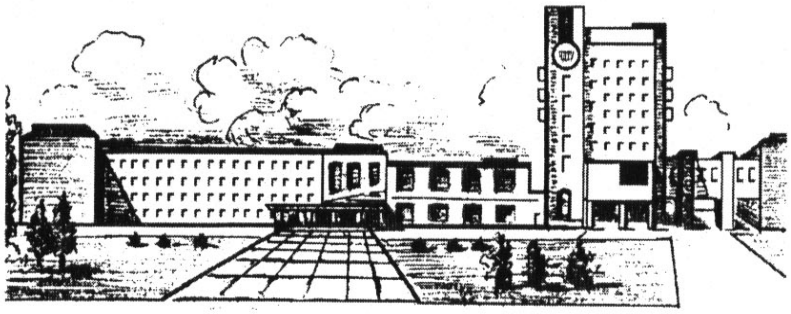
ISSN 2411-5363 (print)
ISSN 2519-4569 (online)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЧЕРНІГІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»



ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

№ 1(43)

Чернігів 2026

УДК 62:67.05
Т38
DOI: 10.25140/2411-5363-2026-1(43)

Друкується за рішенням вченої ради Національного університету «Чернігівська політехніка» (протокол № 2 від 26.01.2026 р.). Науковий журнал «Технічні науки та технології» внесено до переліку наукових фахових видань України, затвердженого Наказом Міністерства освіти і науки України від 11.07.2019 р. № 975 (зі змінами від 09.02.2021 № 157), відповідно до якого журналу надано категорію «Б».

Технічні науки та технології : науковий журнал / Національний університет «Чернігівська політехніка». – Чернігів : НУ «Чернігівська
Т38 політехніка», 2026. – № 1(43). – 458 с.

У журналі вміщено статті, присвячені теоретичним та експериментальним дослідженням у науковому напрямі «Технічні науки» за спеціальностями: прикладна механіка, матеріалознавство, машинобудування, інформаційно-комп'ютерні технології, електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, хімічні та харчові технології, будівництво та геодезія. Статті прорецензовані провідними вченими у відповідних галузях знань.

Журнал «Технічні науки та технології» буде корисним для науковців, науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та студентів технічних спеціальностей закладів вищої освіти.

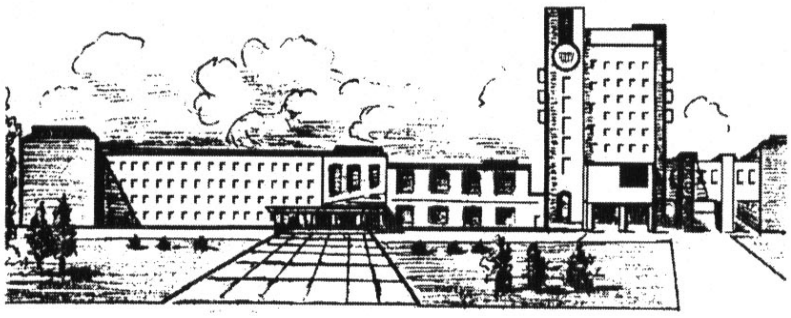
УДК 62:67.05

Головний редактор:
Казимир В. В., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка».
Заступник головного редактора:
Болотов М. Г., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка».
Члени редакційної колегії:
Прикладна механіка, матеріалознавство та машинобудування
Болотов Г. П., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;
Єрошенко А. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;
Кальченко В. В., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;
Кальченко В. І., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;
Марков О. Є., доктор технічних наук, професор, Донбаська державна машинобудівна академія;
Новомлинець О. О., доктор технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;
Охріменко О. А., доктор технічних наук, професор, КПІ ім. Ігоря Сікорського;
Повстяной О. Ю., доктор технічних наук, доцент, Луцький національний технічний університет;
Сапон С. П., кандидат технічних наук, доцент, КПІ ім. Ігоря Сікорського;
Сіра Н. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;
Федориненко Д. Ю., доктор технічних наук, професор, Tohoku University, Японія;
Ющенко С. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;
Michał Bembenek, Doctor of Engineering Sciences, Professor, AGH University of Krakow (Krakow, Poland).
Інформаційно-комп`ютерні технології
Азаров О. Д., доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет;
Дорош М. С., доктор технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;
Єременко В. С., доктор технічних наук, професор, КПІ ім. Ігоря Сікорського;
Зайцев С. В., доктор технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;
Казимир В. В., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;
Криворучко О. В., доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України;
Мелешко Є. В., доктор технічних наук, професор, Центральноукраїнський національний технічний університет;
Павленко П. М., доктор технічних наук, професор, Державний університет «Київський авіаційний інститут»;
Семенов С. Г., доктор технічних наук, професор, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця;
Цюцюра С. В., доктор технічних наук, професор, Державний торговельно-економічний університет.
Енергетика, електротехніка та електромеханіка
Вінніков Д., доктор технічних наук, професор, Таллінський університет технологій (Естонія);
Волков І. В., доктор технічних наук, професор, Інститут електродинаміки НАН України;
Галкін І., доктор технічних наук, професор, Ризький технічний університет (Латвія);
Гусев О. О., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;
Денисов Ю. О., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;
Приступа А. Л., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;
Ромеро-Кадавал Е., доктор технічних наук, професор, Університет Естремадури (Іспанія);
Степенко С. А., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка».
Хімічні та харчові технології
Антонюк І. Ю., кандидат технічних наук, доцент, Державний торговельно-економічний університет;
Буяльська Н. П., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;
Дударєв І. М., доктор технічних наук, професор, Луцький національний технічний університет;
Звірко О. І., доктор технічних наук, професор, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України;
Плаван В. П. доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну;
Самохвалова О. В., кандидат технічних наук, професор, Харківський державний університет харчування та торгівлі;
Сиза О. І., доктор технічних наук, професор, Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка;
Трус І. М., доктор технічних наук, доцент, КПІ ім. Ігоря Сікорського;
Цибуля С. Д., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка».
Будівництво та геодезія
Білик С. І., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури;
Корзаченко М. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка».
Крячок С. Д., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;
Михайловський Д. В., доктор технічних наук, доцент, Київський національний університет будівництва і архітектури;
Паляниця Б. Б., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Львівська політехніка»;
Савенко В. І., кандидат технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури;
Терещук О.І. кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;
Шульц Р. В., доктор технічних наук, професор, Університет нафти та мінералів імені короля Фахда, Міждисциплінарний науково-дослідний центр авіаційних та космічних досліджень, керівник лабораторії дистанційного зондування та аналізу, Саудівська Аравія.

© НУ «Чернігівська політехніка», 2026

ISSN 2411-5363 (print)
ISSN 2519-4569 (online)

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
CHERNIHIV POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY



TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

SCIENTIFIC JOURNAL

№ 1(43)

Chernihiv 2026

UDC 62:67.05
DOI: 10.25140/2411-5363-2026-1(43)

Published by the decision of the Academic Council of the Chernihiv Polytechnic National University (protocol № 2 dated 26.01.2026). Scientific journal "Technical sciences and technologies" is included into the list of scientific specialized editions of Ukraine, approved by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine dated July 11, 2019 № 975 (as amended from February 9, 2021 № 157), according to which magazine is assigned a category «B».

Technical sciences and technologies : scientific journal / Chernihiv Polytechnic National University. – Chernihiv : Chernihiv Polytechnic National University, 2026. – № 1(43). – 458 p.

This journal contains articles devoted to theoretical and experimental research in the scientific direction "Technical Sciences" by specialties: applied mechanics, materials science and machine building, information and computer technologies, electric power engineering, electrical engineering and electromechanical engineering, chemical and food technologies, construction and geodesy. The articles are reviewed by leading scientists in relevant fields of knowledge.

Journal "Technical sciences and technologies" will be useful for the scientific and technical workers, postgraduates, master students and students of higher technical educational establishment.

UDC 62:67.05

Editor in chief:
Kazymyr V.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chernihiv Polytechnic National University.
Deputy Editor in chief:
Bolotov M.G., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University.
Members of the Editorial Board:
Applied mechanics, materials science and machine building
Bolotov H.P., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;
Yeroshenko A.M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University;
Kalchenko V.V., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;
Kalchenko V.I., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;
Markov O.Ye., Doctor of Technical Sciences, Professor, Donbaska derzhavna mashynobudivna akademiia;
Novomlynets O.O., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University;
Okhrimenko O. A., Doctor of Technical Sciences, Professor; Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute;
Povstianoi O.Yu., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Lutsk National Technical University;
Sapon S.P., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute;
Sira N.M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University»;
Fedorynenko D.Yu. Doctor of Technical Sciences, Professor, Tohoku University, Japan;
Yushchenko S.M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University»;
Michał Bembenek, Doctor of Engineering Sciences, Professor, AGH University of Krakow (Krakow, Poland).
Information and computer technologies
Azarov O.D., Doctor of Technical Sciences, Professor, Vinnytsia National Technical University;
Dorosh M.S., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University»;
Yeremenko V.S., Doctor of Technical Sciences, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute;
Zaitsev S.V., Doctor of Technical Sciences, Chernihiv Polytechnic National University.
Kazymyr V.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chernihiv Polytechnic National University;
Kryvoruchko O.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, National University of Life Resources and Environmental Management of Ukraine;
Meleshko Ye.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Central Ukrainian National Technical University;
Pavlenko P.M., Doctor of Technical Sciences, Professor, State University "Kyiv Aviation Institute";
Semenov S.H., Doctor of Technical Sciences, Professor, Semyon Kuznets Kharkiv National Economic University;
Tsiutsiura S.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, State Trade and Economic University.
Power engineering, electrical engineering and electromechanical engineering
Vinnikov D., Doctor of Science, Senior Researcher, Head of Power Electronics R&D Group, Tallinn University of Technology, Tallinn, Estonia;
Volkov I.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine;
Galkin I., Doctor of Science, Professor, Riga Technical University, Riga, Latvia;
Husev O.O., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University;
Denysov Yu.A., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chernihiv Polytechnic National University;
Prystupa A.L., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University;
Romero-Cadaval E., Doctor of Science, Professor, University of Extremadura, Badajoz, Spain;
Stepenko S.A., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University.
Chemical and food technologies
Antoniuk I.Yu., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, State University of Trade and Economics;
Buialska N.P., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University;
Dudarev I.M., Doctor of Technical Science, Professor, Lutsk National Technical University;
Zvirko O.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine;
Plavan V.P., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Technologies and Design;
Samokhvalova O.V., PhD in Technical Sciences, Professor, Kharkiv State University of Food Technology and Trade;
Syza O.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, Taras Shevchenko National University «Chernihiv Collegium»;
Trus I. M., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute;
Tsybulia S.D., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University.
Construction and geodesy
Bilyk S.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture;
Korzachenko M. M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University;
Kriachok S.D., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University;
Mykhailovskyi D.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture;
Palianysia B.B., PhD in Technical Sciences, PhD in Technical Sciences, Lviv Polytechnic National University;
Savenko V.I., PhD in Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture;
Tereshchuk O.I., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University;
Shults R.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Interdisciplinary Research Center for Aviation and Space Research, Head of Remote Sensing and Analysis Laboratory, Saudi Arabia.

© Chernihiv Polytechnic National University, 2026

ЗМІСТ

РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

Кальченко В. В., Кологойда А. В., Сіра Н. М., Пасов Г. В., Мурашковська В. П., Легеда В. А. Дослідження впливу послідовності обробки деталі гідравлічного приводу на її точність з використанням тривимірного моделювання. 9

Сахно Є. Ю. Концепція взаємодії природних та штучних систем. 22

Bolotov M., Bolotov H., Hanieiev T., Nahorna I., Hrechka V. Technological parameters and quality control while diffusion welding in a glow discharge....34

Кондрашев П. В., Степура О. М. Застосування методів математичної статистики при реалізації процеса лазерного різання кубічного нітриду бору. 47

Манохін А. С., Клименко С. А., Копєйкіна М. Ю., Клименко С. А., Чумак А. О., Камчатна-Степанова К. В. Моделювання віброперемiщень та оцінка вібростійкості інструментів при різанні з ударами. 57

Шапошник І. А. Вплив властивостей поверхонь металів на їх лазерне різання 69

Петров О. Д., Корбут Є. В. Вибір складу та топографії модифікованого поверхневого шару інструмента для обробки полімерних композитів....79

РОЗДІЛ ІІ. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Ткач Ю. М., Одноколов В. О., Петренко Т. А. Ризики впровадження штучного інтелекту: безпекові, правові та соціально-економічні аспекти. 90

Бобришев Є. С. Методи оптимізації тривимірних моделей для реального часу. 105

Роговенко А. І., Клочко К. М., Милиця А. Ю. Архітектура децентралізованої системи каталогізації книжкових метаданих із JSON API та федеративною синхронізацією. 114

Супруненко М. К., Мироненко М. І., Павленко І. В., Прилепа Д. В. Підвищення точності машинного навчання системи розпізнавання електроміографічних сигналів....128

Ярова І. А. Формалізована модель порушника інформаційної безпеки для систем захисту інформації 141

Бивойно Т. П., Бивойно П. Г. Архітектура та програмна реалізація методів оптимізації параметрів функцій регресії (в умовах локальних екстремумів) з використанням гібридного підходу....149

Байда В. Д., Велігорський О. А. Розробка та практична імплементація інформаційної технології діагностики перетворювачів постійного струму на основі фізично-орієнтованих цифрових двійників....161

Коваленко С. В., Красножон О. В. Хропатий О. М. Інформаційна система моніторингу показів лічильників теплової енергії на основі технології інтернету речей....183

Кучерявий М. В., Гулак Г. М. Модель прийняття рішень у системі підтримки гарантоздатності управління безпілотних літальних апаратів....195

Насенок К. О., Войцеховська М. М. Метод аналізу та оцінювання складності міграції вебзастосунків з клієнтським рендерингом для побудови адаптивних патернів переходу до серверного рендерингу. 216

Прищепа В. О., Задорожній А. О. Проєктування LLM-керованої метасистеми для динамічного агентно-орієнтованого моделювання. 229

Савка А. Я., Копилець М. М. Методи глибинного навчання з підкріпленням для адаптивної оптимізації маршрутів військової логістики. 246

Тимошенко А. В., Лисенко Д. Е. Застосування методів машинного навчання в адаптивній системі оцінювання знань студентів....254

Ткачук С. М., Бондар В. В. Інтелектуальна система оцінювання якості нафтопродуктів на основі ансамблевих методів машинного навчання. 269

Хижняк А. В., Казимир В. В. Моделі персоналізації навчання в цифровому освітньому середовищі 279

РОЗДІЛ ІІІ. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

Фролова Л. А., Прокопенко Н. І. Дослідження впливу параметрів плазмового синтезу на поглинальні та магнітні властивості фериту кобальту. 291

Філінська Т. Г., Александрова О. С., Філінська А. О. Перспективні добавки рослинного походження для кондитерської глазурі. 300

Челябієва В. М. Борошняні композиційні суміші у технології хліба. 309

РОЗДІЛ ІV. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

Алексієвський Д. Г., Баранов В. О., Туришев К. О., Шмалій С. Л. Математична модель термоелектричного перетворювача на базі ефекту Пельтьє. 315

Мінко О. М. Параметричне визначення оптимальної геометрії вальниці важкої електричної машини.....323

Середа О. В. Фаззі-регулятор у зовнішньому контурі стабілізації крену квадрокоптера 332

Tarasiuk V., Gorodny O. Increasing energy efficiency of quasi-resonant converters under dynamic loads by means of adaptive AI control and simulation. 344

РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

Зацерковний В. І., Васильєв О. М. Оцінка перспектив розвитку водневої енергетики в Україні. 355

Смілка В. А. Перехід від сталого до відповідального землекористування. 382

Гера О. В. Перехід України від Балтійської системи висот до Європейської вертикальної референцної системи у контексті євроінтеграційних процесів та модернізації національної геодезичної інфраструктури.....391

Ковров А. В., Марченко Т. І. Концепція науково-технічного нагляду при реставрації пам’яток архітектури та містобудування. 402

Крячок С. Д., Терещук О. І. Система картографування території радіаційного забруднення на платформі БПЛА. 415

Стахів І. Р., Ворох В. В., Деркач В. О., Чепіль С. В. Технології ГІС та ДЗЗ в ефективному використанні земельних ресурсів.....430

Цвик О. В., Малік Т. М. Розробка методики дистанційної ідентифікації впливу бойових дій на придатність сільськогосподарських угідь. 447

ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ СТАТЕЙ.....457

CONTENT

SECTION I. APPLIED MECHANICS, MATERIALS SCIENCE AND MACHINE BUILDING

Kalchenko V., Kolohoida A., Sira N., Pasov G., Murashkovska V., Leheda V. Research of the influence of machining sequence on the accuracy of a hydraulic drive part using three-dimensional modeling 9

Sakhno Ye. Concept of interaction between natural and artificial systems 22

Bolotov M., Bolotov H., Hanieiev T., Nahorna I., Hrechka V. Technological parameters and quality control while diffusion welding in a glow discharge 34

Kondrashev P., Stepura O. Application of methods of mathematical statistics in the implementation of the laser cutting process of cubic boron nitride 47

Manokhin A., Klymenko S., Kopieikina M., Klymenko S., Chumak A., Kamchatna-Stepanjva K. Modeling of vibration transfer and evaluation of vibration resistance of tools during impact cutting 57

Shaposhnyk I. The influence of metals' surface properties on their laser cutting 69

Petrov O., Korbut Ie. Selection of the composition and topography of the modified surface layer of the tool for processing polymer composites 79

SECTION II. INFORMATION AND COMPUTER TECHNOLOGIES

Tkach Yu., Odnokolov V., Petrenko T. Risks of implementation of artificial intelligence: security, legal, and socio-economic aspects 90

Bobryshev Ye. Methods of 3D model optimization for real-time applications 105

Rohovenko A., Klochko K., Mylytsia A. Architecture of a decentralized book metadata 114 cataloging system with json api and federated synchronization 114

Suprunenko M.K., Myronenko M.I., Pavlenko I.V., Prylepa D.V. Method of deep information-extreme machine learning for the recognition system of emg signals of a hand prosthesis 128

Yarova I. Formalized model of information security violator for information protection systems 141

Byvoino T., Byvoino P. Architecture and software implementation of methods for optimization of parameters of regression functions (in conditions of local extremes) using a hybrid approach 149

Baida V., Velihorskyi O. Information technology for hardware diagnostics of dc-dc converters based on physically-informed digital twins 161

Kovalenko S., Krasnozhon O., Khropatyi O. Information system for monitoring data from heat energy meters based on the internet of things technology 183

Kucheriavyi M., Hulak H. Decision-making model in the control dependability support system of unmanned aerial vehicles 195

Nasenok K., Voitsekhovska M. Method for analyzing and estimating migration complexity of client-side rendered WEB applications for building adaptive migration patterns to server-side rendering 216

Pryshchepa V., Zadorozhnii A. Design of llm-driven meta-system for dynamic agent-oriented modeling 229

Savka A., Kopylets M. Methods of deep reinforcement learning for adaptive optimization of military logistics routes 246

Tymoshenko A., Lysenko D. Application of machine learning methods in an adaptive student knowledge assessment system 254

Tkachuk S., Bondar V. Intelligent system for petroleum product quality estimation based on ensemble machine learning methods 269

Khyzhniak A., Kazymyr V. Models of personalized learning in the digital educational environment 279

SECTION III. CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGIES

Frolova L., Prokopenko N. Study of the influence of plasma synthesis parameters on the absorption and magnetic properties of cobalt ferrite 291

Filinska T., Aleksandrova O., Filinska A. Promising additives of plant origin for confectionery glaze 300

Cheliabiieva V. Flour compounds in bread technology 309

SECTION IV. ENERGY, ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTROMECHANICS

Aleksiievskyi D., Baranov V., Turyshev K., Shmalii S. Mathematical model of a thermoelectric converter based on the peltier effect 315

Minko O. Parametric determination of optimal geometry of heavy electric machine bearing 323

Sereda O. Recursive digital fuzzy controller with frequency-parameter adaptation in the outer roll stabilization loop of a quadcopter 332

Tarasiuk V., Gorodny O. Increasing energy efficiency of quasi-resonant converters under dynamic loads by means of adaptive AI control and simulation. 344

SECTION V. CONSTRUCTION AND GEODESY

Zatserkovny V., Vasyliev O. Assessing the prospects for hydrogen energy development in Ukraine 355

Smilka V. Transition from sustainable to responsible land use 382

Gera O. Ukraine's transition from the Baltic height system to the European vertical reference system in the context of European integration and modernization of national geodetic infrastructure 391

Kovrov A. V., Marchenko T. I. Concept of independent technical supervision for restoration of architectural monuments and urban planning 402

Kryachok S., Tereshchuk O. System for mapping radioactive contamination areas on the UAV platform 415

Stakhiv I., Vorokh V., Derkach V., Chepil S. GIS and remote sensing technologies for efficient land resource use 430

Tsvyk O., Malik T. Development of a methodology for remote identification of the impact of military actions on agricultural land suitability 447

BASIC REQUIREMENTS FOR EXECUTION AND SUBMISSION OF MANUSCRIPTS OF SCIENTIFIC ARTICLES 457

РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-9-21
УДК 621.914

Володимир Віталійович Кальченко[1], Антоніна Вікторівна Кологойда[2], Наталія Миколаївна Сіра[3], Генадій Володимирович Пасов[4], Віра Петрівна Мурашковська[5], Владислав Анатолійович Легеда[6]

[1]доктор технічних наук, професор, професор кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: vvkalchenko74@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-9072-2976. **ResearcherID:** G-6752-2014

[2]кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: kolohoida@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-1742-2686. **ResearcherID:** I-1118-2014

[3]кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: nnseraya@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-6242-5210. **ResearcherID:** K-2658-2017

[4]кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: genapasov@gmail.com. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0001-7248-9085. **ResearcherID:** H-4455-2014

[5]старший викладач кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: vmurashkovska@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-0556-8709 **ResearcherID:** G-9757-2016

[6]здобувач вищої освіти, гр. ММБ-241
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: vladislavleheda@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОСЛІДОВНОСТІ ОБРОБКИ ДЕТАЛІ ГІДРАВЛІЧНОГО ПРИВОДУ НА ЇЇ ТОЧНІСТЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ТРИВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Розглянуто вплив послідовності технологічних операцій на точність виготовлення корпусної деталі гідравлічного приводу на прикладі підшипникового вузла гідромотора. Проаналізовано два варіанти обробки, які характеризуються різною жорсткістю оброблюваного елементу. Проведено розрахунки режимів різання, крутного моменту, осьової сили та часу обробки. З використанням методу скінченних елементів у SolidWorks виявлено вплив режимів обробки на деформацію деталі в процесі свердління отворів. Встановлено, що вибір послідовності операцій впливає на точність отворів та продуктивність обробки.

Ключові слова: *технологія виготовлення; свердління; точність; моделювання; метод скінченних елементів.*
Рис.: 16. Табл.: 2. Бібл.: 8.

Актуальність теми дослідження. У сучасних умовах важливим критерієм якісного виробництва є отримання бажаної деталі за мінімальний період часу з мінімальними витратами на виробництво. Тобто важливим є не тільки кінцевий продукт, але і правильно визначена послідовність обробки та обрані режими. Тому задача дослідження впливу послідовності технологічних операцій виготовлення деталей та вибору режимів обробки є актуальною і дозволить оптимізувати процеси на виробництві та підвищити його конкурентоспроможність.

Постановка проблеми. Виготовлення деталей ускладненої геометрії потребує поєднання різноманітних операцій. У переважній більшості остаточне формоутворення та визначення точності геометричних розмірів деталі забезпечується на кінцевих етапах обробки. На стан поверхневого шару деталі значним чином впливають обрані режими різання, так при завищеній подачі та глибині різання збільшується температура в зоні обробки, що може призвести до виникнення припалів. Крім того, з підвищенням параметрів режимів обробки зростають сили різання, що викликають пружні деформації деталі та додатково впливають на точність геометричних розмірів, що особливо важливо

© В. В. Кальченко, А. В. Кологойда, Н. М. Сіра, Г. В. Пасов, В. П. Мурашковська, В. А. Легеда, 2026

при обробці нежорстких частин виробу. Однак використання занижених параметрів режимів різання зменшує продуктивність обробки. Отже, на етапі вибору послідовності виготовлення деталі необхідно враховувати різні фактори, які дозволять забезпечити необхідну якість деталі при досягненні максимальної продуктивності її виготовлення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [1] розглянуто процес розточування отворів на багатоцільовому свердлильно-фрезерно-розточувальному верстаті. При цьому точність міжосьових розмірів залежить від вибору баз, режимів обробки та черговості операцій. Автором визначено сумарну похибку обробки, а також узагальнено рівень впливу технологічних факторів на точність корпусних деталей. У роботі [2] автори розглядають особливості обробки великогабаритних корпусних деталей, де послідовність технологічних операцій виготовлення значним чином впливає на забезпечення точності, особливо при чистовій та оздоблювальній обробці. У [3] розглянуто особливості механічної обробки полімерних заготовок, виготовлених методом FDM-друку. У роботі [4] запропоновані загальні принципи просторового твердотільного моделювання деталей з метою подальшого дослідження, підготовки технічної документації та виготовлення. У [5] описані особливості підготовки моделі для проведення аналізу методом скінченних елементів у системі SolidWork, а також методика визначення параметрів дослідження та аналізу результатів розрахунку.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Однак, наразі не досліджено вплив вибору послідовності виготовлення деталей на їхню точність.

Мета статті. Головною метою роботи є дослідження впливу послідовності виконання технологічних операцій з виготовлення корпусної деталі на точність обробки.

Виклад основного матеріалу. У техніці широко використовуються різноманітні гідромотори, що призначені для перетворення енергії потоку рідини в механічну енергію обертання робочого органу. Є значна кількість типів гідромоторів та їх варіантів конструктивних виконань. Тип та конструкція гідромотора обирається залежно від бажаних механічних характеристик та загальної будови механізму, де цей мотор планується використовувати. Незалежно від конструкції гідромотора обов'язковим є наявність підшипникового вузла, який повинен забезпечити надійне позиціонування та вільне обертання робочих органів.

Для прикладу розглянемо існуючу конструкцію підшипникового вузла (рис. 1). Він складається з корпусної деталі *1* – підшипниковий вузол; дистанційної втулки *2*; двох підшипників *3*; стопорних кілець *4* та захисної манжети *5*. Деталі *3, 4* та *5* є стандартними виробами, виготовляються масово на спеціалізованих підприємствах. Дистанційна втулка *2* є досить простою деталлю, яка призначена для забезпечення номінальної відстані між підшипниками *3*. Найбільш складною і відповідальною в цьому вузлі є корпусна деталь *1* – підшипниковий вузол (рис. 2). Вона має значний вплив на працездатність всього вузла й потребує особливої уваги при виготовленні.

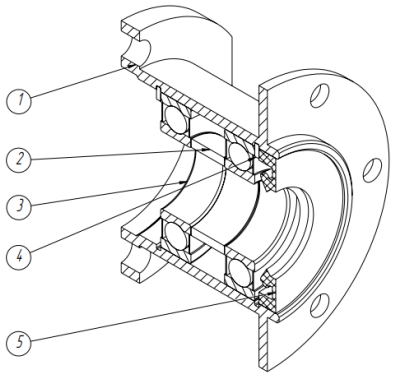


Рис. 1. Підшипниковий вузол гідромотора

Джерело: розроблено авторами.

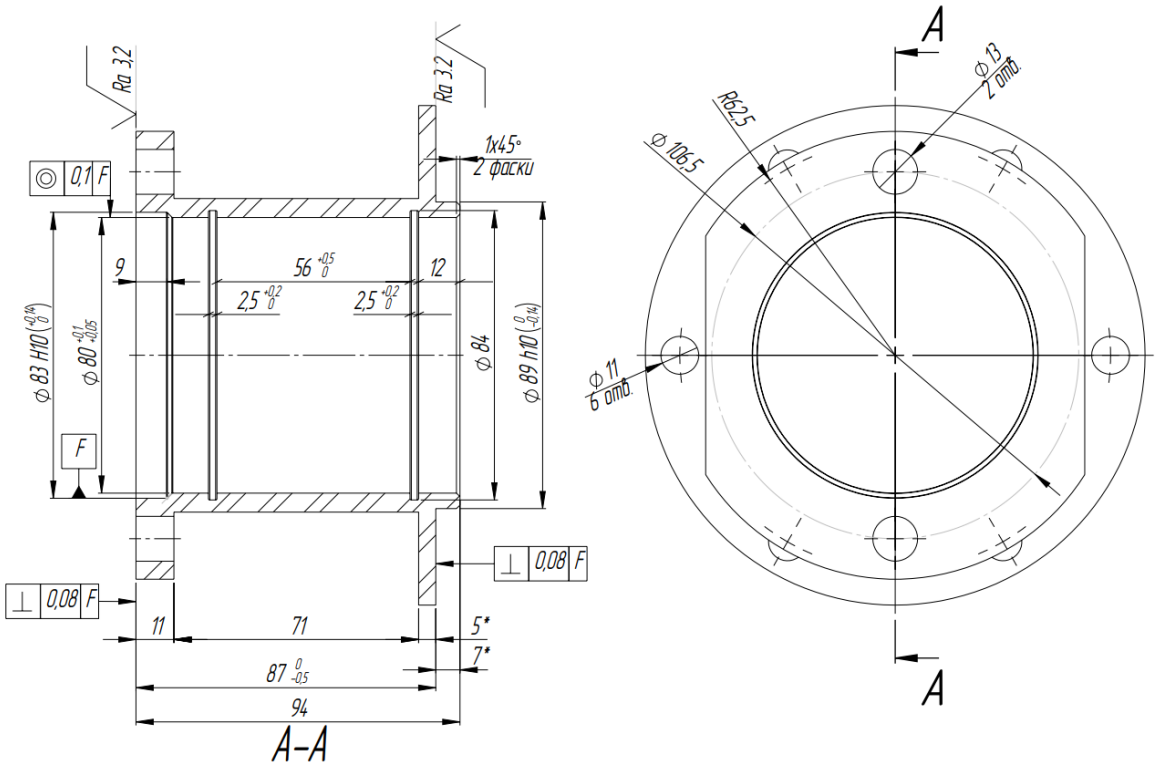


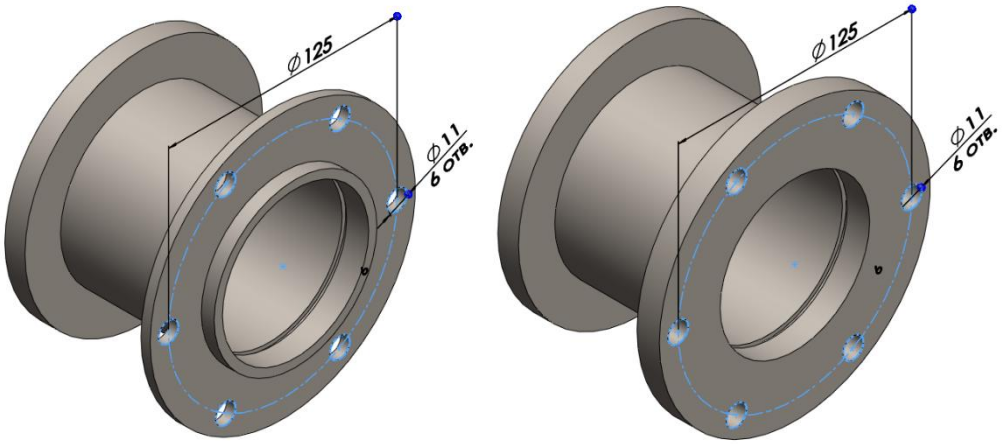
Рис. 2. Підшипниковий вузол

Джерело: розроблено авторами.

Загалом послідовність виготовлення деталі цієї конфігурації є типовою. Як заготовка обирається пруток діаметром ø150 мм. Враховуючи діаметр заготовки, пруток попередньо нарізають на штучні деталі, довжина яких складається із загальної довжини деталі та припусків на обробку торців. Подальша обробка здійснюється на токарному і фрезерному верстатах і включає підрізання торців, точіння по зовнішньому діаметру та розточування внутрішнього отвору. Обробка внутрішніх торцевих та зовнішньої циліндричної поверхонь виконується за декілька проходів з остаточним формуванням двох фланців. На кожному з фланців необхідно утворити ряд отворів, а на правому (рис. 2) – додаткові лиски. Товщина правого фланця становить 11 мм, що забезпечує його достатню жорсткість і не потребує додаткової уваги при обробці. При цьому товщина лівого фланця становить лише 5 мм і при свердлінні кругових отворів він буде деформуватись в осьовому напрямку, що негативно вплине на точність отворів. Для забезпечення бажаної жорсткості при обробці доцільно спочатку виконати кругові отвори, а вже потім остаточно сформувати зовнішній контур із визначенням заданої товщини фланця.

Розглянемо два варіанти утворення набору *6* кругових отворів діаметром 11 мм по торцевій частині деталі (рис. 3). А саме, з попереднім виконанням повної токарної обробки циліндричної та торцевої частин (рис. 3, *а*) та з частковою токарною обробкою контуру, при якій залишається припуск по торцевій поверхні, для збереження жорсткості (рис. 3, *б*).

Розглянемо схему свердління отворів за другим методом (рис. 4). При виготовленні цих отворів, наявні установчий рух – позиціонування свердла відносно поверхні деталі, головний рух різання – обертання, та осьова подача для забезпечення утворення наскрізного отвору в деталі. В процесі свердління виникає осьова сила різання, що намагається вигнути деталь. При збільшенні осьової подачі збільшується сила різання, а відповідно і величина відгинання заготовки, що негативно впливає на точність отвору.



а *б*

Рис. 3. Методи виконання кругових отворів:
а – з попереднім виконанням повної токарної обробки;
б – з частковою токарною обробкою контуру

Джерело: розроблено авторами.

Для свердління отворів обираємо твердосплавне свердло діаметром 11 мм SCD 110-040-120 AP3N [6]. Обраний інструмент додатково має покриття з нітриду титану алюмінію (TiAlN), що забезпечує високу термостійкість і зносостійкість, та дозволяє ефективно використовувати свердло при обробці різних сталей, чавуну, твердих сплавів тощо.

Відповідно до схеми свердління отворів (рис. 4) деталь *1* закріплюється в патроні за допомогою додаткового пристосування, свердло *2* здійснює переміщення X_c, вздовж осі X для забезпечення позиціонування, обертається з кутовою швидкістю ω і здійснює осьове переміщення S.

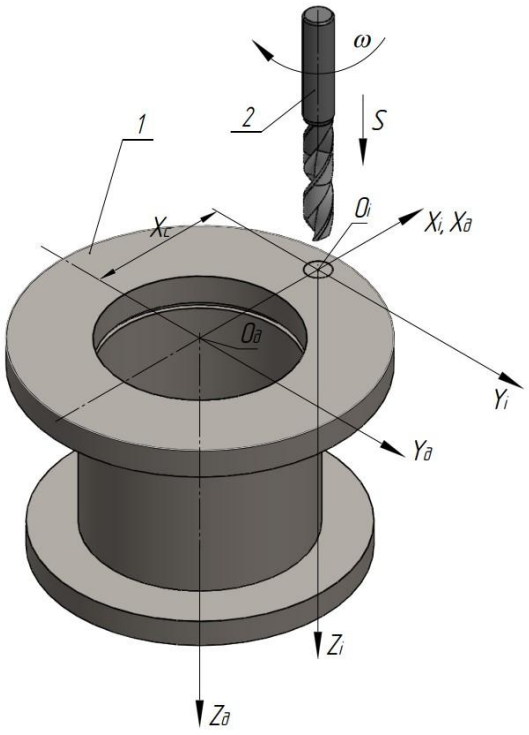


Рис. 4. Просторова схема свердління отворів 11 мм

Джерело: розроблено авторами.

Розрахуємо основні режими різання та параметри обробки за методикою, наведеною в [7].

Глибина різання для обох схем обробки (рис. 3) буде однаковою: $t = D/2 = 11/2 = 5$ мм.

Визначаємо глибину отвору (глибокий чи неглибокий). Для цього знайдемо співвідношення: $l_1/D = 5/11 = 0{,}45$ для першої схеми обробки та $l_1/D = 12/11 = 1{,}1$ для другої схеми обробки. В обох випадках співвідношення менше *5*, отже, отвір не є глибоким.

Обираємо максимально допустиму за міцністю свердла подачу. Відповідно до [29] для діаметра свердла 11 мм при обробці конструкційної сталі рекомендовано $S_1 = 0{,}3$ мм/об.

Корегуємо подачу з врахуванням параметрів обробки:

$$S = S_1 \cdot K_{ls} \cdot K_{so} \cdot K_{js} \cdot K_{is}, \quad (1)$$

де K_{ls} – поправковий коефіцієнт на глибину отвору; $K_{ls} = 1$; K_{so} – поправковий коефіцієнт для досягнення більш високої якості у зв'язку з наступними операціями зенкерування або розсвердлювання. Оскільки подальша обробка не передбачена, тому $K_{so} = 1$; K_{js} – поправковий коефіцієнт на недостатню жорсткість системи верстат - пристосування - інструмент – деталь (ВПІД), система ВПІД верстату з достатньою жорсткістю, тому $K_{js} = 1$; K_{is} – поправковий коефіцієнт на інструментальний матеріал. Оскільки матеріал свердла – твердий сплав, то $K_{is} = 0{,}6$.

Отже, $S = 0{,}18$ мм/об.

Швидкість різання під час свердління розраховуємо за формулою

$$V = \frac{C_v \cdot D^q}{T^m \cdot S^y} \cdot K_v, \quad (2)$$

де коефіцієнт $C_v = 7$, показники $q = 0{,}4$, $y = 0{,}7$, $m = 0{,}2$; T – період стійкості, Т = 20 хв; K_v – загальний поправковий коефіцієнт, який враховує фактичні умови роботи: $K_v = K_{Mv} \cdot K_{iv} \cdot K_{lv}$, де K_{iv} – коефіцієнт, який враховує матеріал різального інструменту, для обраного свердла $K_{iv} = 0{,}65$; K_{lv} – коефіцієнт, який враховує глибину свердління, враховуючи що $l/D<3$, то $K_{lv} = 1$; K_{Mv} – коефіцієнт, який враховує матеріал оброблюваної заготовки. Для сталі розраховують за формулою: $K_{Mv} = K_r \cdot \left(\frac{750}{\sigma_B}\right)^{n_v}$, коефіцієнт $K_r = 1$, $\sigma_B = 450 МПа$ – межа міцності, показник ступеня $n_v = 1$, отже $K_{Mv} = 1 \cdot \left(\frac{750}{450}\right)^1 = 1{,}67$, та $K_v = 1{,}67 \cdot 0{,}65 \cdot 1 = 1{,}08$.

Таким чином швидкість різання становитиме

$$V = \frac{C_v \cdot D^q}{T^m \cdot S^y} \cdot K_v = \frac{7 \cdot 11^{0,4}}{20^{0,2} \cdot 0{,}18^{0,7}} \cdot 1{,}08 = 36{,}1 \text{ м/хв.}$$

Крутний момент під час свердління

$$M_{кр} = 10 \cdot C_M \cdot D^q \cdot S^x \cdot K_p, \quad (3)$$

де коефіцієнт $C_M = 0{,}0345$, значення показників $q = 2$, $x = 0{,}8$; K_p – загальний поправковий коефіцієнт, який враховує фактичні умови роботи, залежить тільки від матеріалу оброблюваної заготовки $K_p = K_{Mp} = \left(\frac{\sigma_B}{750}\right)^n$, де $\sigma_B = 450\ МПа$ – границя міцності, показник степеня $n = 0{,}75$ для різальної частини із твердого сплаву і швидкорізальної сталі. Тоді $K_p = K_{Mp} = \left(\frac{450}{750}\right)^{0,75} = 0{,}68$.

Відповідно крутний момент становить

$$M_{кр} = 10 \cdot 0{,}0345 \cdot 11^2 \cdot 0{,}18^{0,8} \cdot 0{,}68 = 7{,}22\ Н \cdot м.$$

Осьова сила під час свердління

$$P_o = 10 \cdot C_p \cdot D^q \cdot S^y \cdot K_p, \quad (4)$$

де коефіцієнт C_p = 68, значення показників q = 1,0; y = 0,7; K_p = 0,68.

Отже, осьова сила при свердлінні отворів становить

$$P_o = 10 \cdot 68 \cdot 11^1 \cdot 0,18^{0,7} \cdot 0,68 = 1535,34\ H = 1,5\ кН.$$

Частота обертання шпинделя

$$n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 36,1}{3,14 \cdot 11} = 1045 \frac{об}{хв}. \quad (5)$$

Обираємо найближчу більшу частоту обертання шпинделя за паспортом верстата: n = 1000 об/хв.

Основний технологічний час, для обробки одного отвору

$$T_o = \frac{L \cdot i}{n \cdot S`}, \quad (6)$$

де i – кількість проходів у певному переході, $i = 1$; L – розрахункова довжина обробки, мм: $L = l + l_1 + l_2$, l – довжина отвору, мм; l_1 – величина на врізання інструмента, приймаємо 3 мм; l_2 – величина на вихід інструмента, мм:

$$l_2 = t \cdot tg70° + 1 = 5,5 \cdot tg70° + 1 = 16,07\ мм.$$

Отже, для обробки отвору за першою схемою L_1 = 5 + 3 + 16,07 = 24,07 мм, за другою схемою – L_2 = 12+3+16,07 = 31,07 мм.

Підставляємо дані у формулу основного технологічного часу (6)

$$T_{o1} = \frac{24,07 \cdot 1}{1000 \cdot 0,18} \cdot 60 = 8,69\ c,\ T_{o2} = \frac{31,07 \cdot 1}{1000 \cdot 0,18} \cdot 60 = 10,35\ c.$$

Згідно з розрахунком основних режимів різання для двох схем значення подачі (1), швидкості різання (2), крутного моменту (3) та сил різання (4) буде однаковим для двох варіантів обробки. Однак, за другою схемою, у порівнянні з першою, збільшується час обробки на 1,66 секунди.

Побудуємо графіки залежності крутного моменту, сили різання та часу обробки від значення подачі для другої схеми обробки, що має більшу жорсткість (рис. 3, б).

За описаними вище рівняннями розрахуємо значення крутного моменту (3), осьової сили різання (4) та часу обробки (6) залежно від зміни величини подачі на оберт. Подачу на оберт умовно приймемо від 0,1 мм/об до 0,36 мм/об, з кроком зміни 0,02 мм/об. Результати розрахунку зобразимо у вигляді таблиці 1 та відповідних графічних залежностей (рис. 5, 6, 7).

Таблиця 1 – Залежність режимів обробки від подачі

S, мм/об	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18	0,2	0,22
$M_{кр}$, Н·м	4,51	5,219	5,904	6,569	7,218	7,853	8,475
P_0, Н	1017	1156	1288	1414	1535	1653	1767
T_0, с	18,64	15,54	13,32	11,65	10,36	9,321	8,474
S, мм/об	0,24	0,26	0,28	0,3	0,32	0,34	0,36
$M_{кр}$, Н·м	9,086	9,687	10,28	10,86	11,44	12,01	12,57
P_0, Н	1878	1986	2092	2195	2297	2396	2494
T_0, с	7,768	7,17	6,658	6,214	5,826	5,483	5,178

Джерело: розроблено авторами.

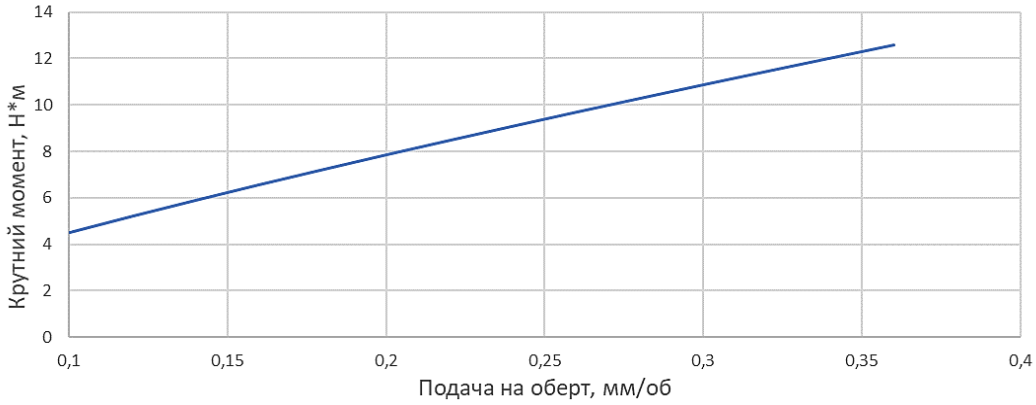


Рис. 5. Графік зміни крутного моменту залежно від величини подачі на оберт
Джерело: розроблено авторами.

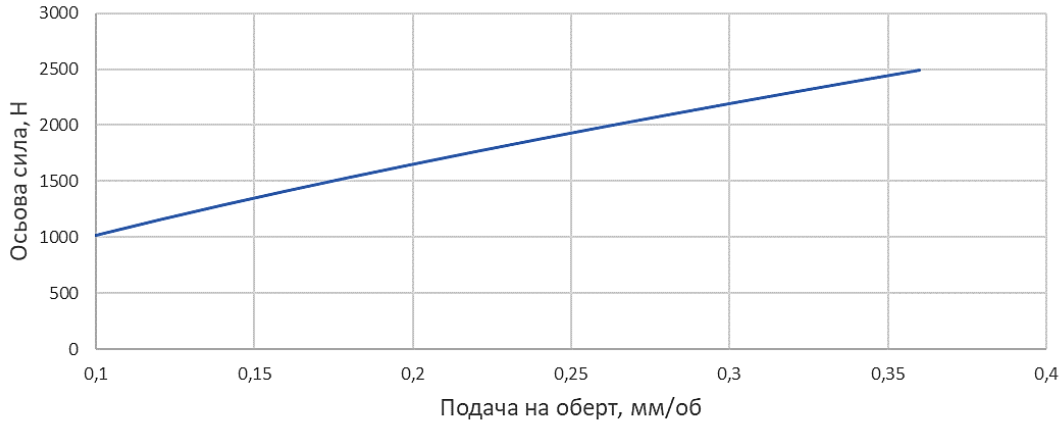


Рис. 6. Графік зміни осьової сили різання залежно від величини подачі на оберт
Джерело: розроблено авторами.

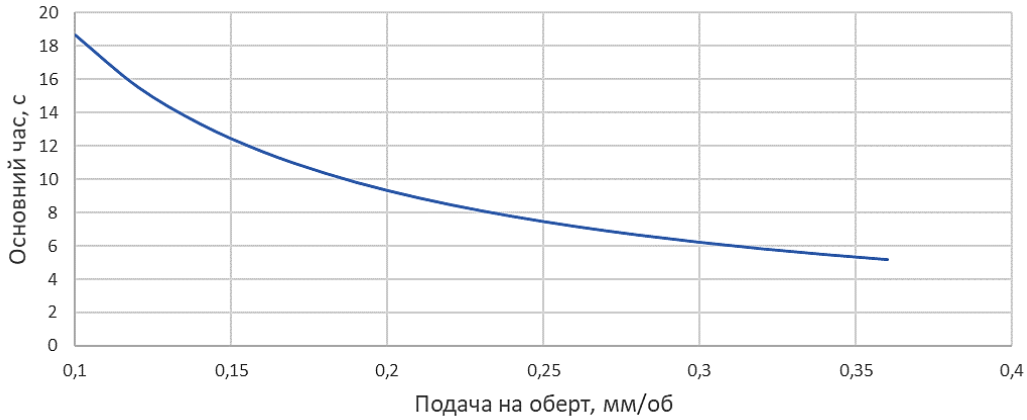


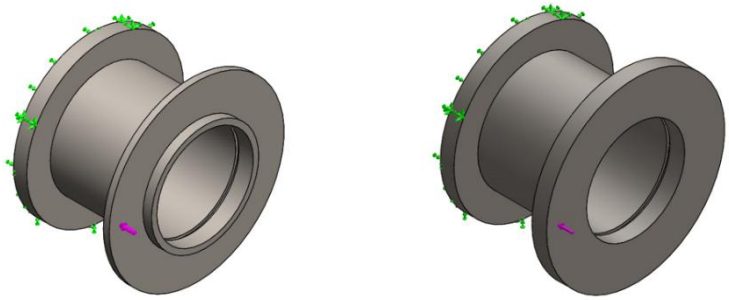
Рис. 7. Графік зміни основного часу обробки одного отвору залежно від величини подачі на оберт
Джерело: розроблено авторами.

Аналіз графіків показує, що при збільшенні подачі на оберт крутний момент збільшується, що вимагає наявності більш потужного двигуна приводу головного руху. Також збільшується осьова сила різання, а разом із нею – деформація тонкої стінки заготовки, що, відповідно, зменшить геометричну точність отвору. Однак при цьому значно зменшується час обробки і збільшується продуктивність виготовлення деталі загалом.

З графіків (рис. 6, 7), а також відповідних рядків таблиці 1 видно, що при постійній зміні подачі на 0,02 мм/об сила різання в середньому збільшується на 100 Н, а зміна часу зі зміною подачі відбувається нелінійно.

Відповідно до можливих схем обробки торцевих отворів (рис. 3) проведемо дослідження величини пружного відтискання фланця деталі при свердлінні з використанням методу кінцевих елементів у системі Solidworks. За базове дослідження приймемо основний варіант підбору режимів різання. А саме: подача на оберт становить 0,18 мм/об, сила різання – 1535 Н, час обробки – 10,35 с.

На рис. 8 показано схему закріплення та місце прикладання сили для двох схем свердління: з попереднім виконанням повної токарної обробки циліндричної та торцевої частин (рис. 8, *а*) та з частковою токарною обробкою контуру, при якій залишається припуск по торцевій поверхні, для збереження жорсткості (рис. 8, *б*).

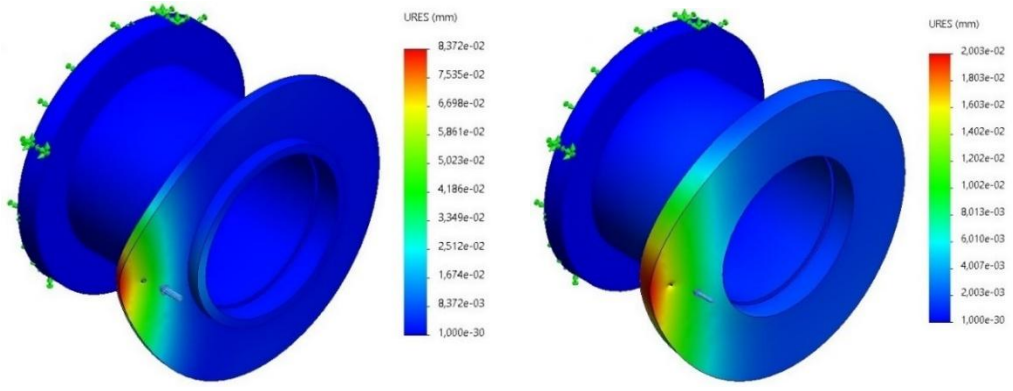


а *б*

Рис. 8. Схема закріплення та прикладання осьової сили різання:
а – з попереднім виконанням повної токарної обробки;
б – з частковою токарною обробкою контуру

Джерело: розроблено авторами.

Сітку скінченних елементів формуємо в автоматичному режимі, що повною мірою задовольняє необхідну точність розрахунків. У результаті автоматизованого розрахунку отримаємо такі діаграми: переміщень заготовки під дією сили різання (рис. 9), розподілу напружень Von Mises Stress (рис. 10) та еквівалентних деформацій Equivalent Strain (рис. 11) для двох схем свердління: з попереднім виконанням повної токарної обробки циліндричної та торцевої частин та з частковою токарною обробкою контуру.

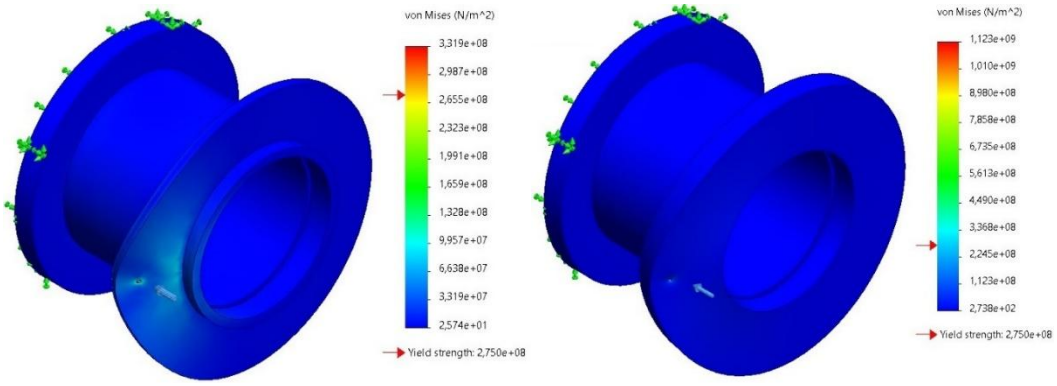


Min = 0,000e+00mm, Max = 8,372e-02mm *Min = 0,000e+00mm, Max = 2,032e-02mm*

а *б*

Рис. 9. Переміщення заготовки під дією сили різання при свердлінні:
а – з попереднім виконанням повної токарної обробки;
б – з частковою токарною обробкою контуру

Джерело: розроблено авторами.

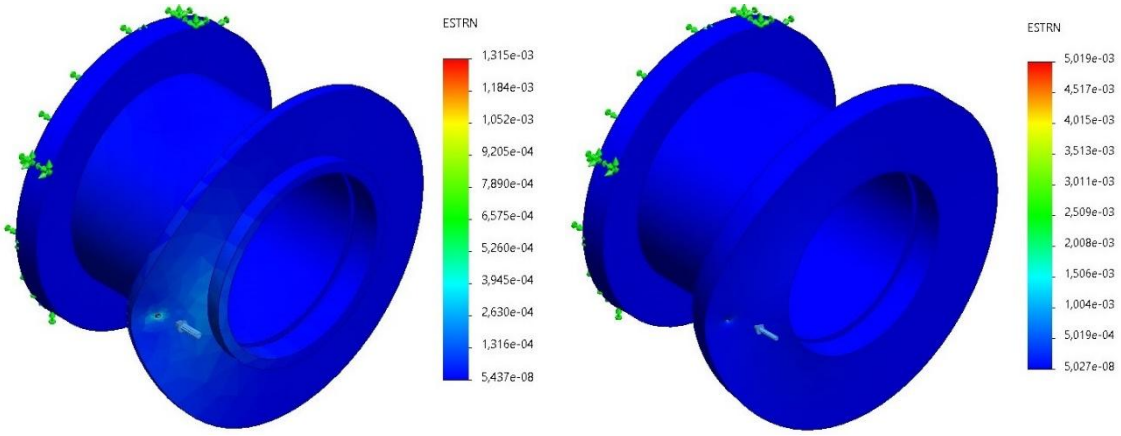


Min = 2,574e+01N/m^2, Max = 3,319e+08N/m^2 *Min = 1,819e+02N/m^2, Max = 1,277e+09N/m^2*

а *б*

Рис. 10. Розподіл напружень (Von Mises Stress) при свердлінні:
а – з попереднім виконанням повної токарної обробки;
б – з частковою токарною обробкою контуру

Джерело: розроблено авторами.



Min = 5,437e-08, Max = 1,315e-03 *Min = 3,016e-08, Max = 5,701e-03*

а *б*

Рис. 11. Еквівалентна деформація (Equivalent Strain) при свердлінні:
а – з попереднім виконанням повної токарної обробки;
б – з частковою токарною обробкою контуру

Джерело: розроблено авторами.

Аналогічно в системі SolidWorks проведемо статичні дослідження для виявлення взаємозв'язку зміни максимальної деформації деталі від сили різання, відповідно – від подачі на оберт. Результати дослідження занесемо в табл. 2.

Таблиця 2 – Залежність максимального переміщення від подачі, мкм

S, мм/об	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18	0,2	0,22
P_0, Н	1017	1156	1288	1414	1535	1653	1767
Схема а	55,4	63,0	70,2	77,1	83,7	90,2	96,3
Схема б	13,3	15,1	16,8	18,5	20,3	21,6	23,1
S, мм/об	0,24	0,26	0,28	0,3	0,32	0,34	0,36
P_0, Н	1878	1986	2092	2195	2297	2396	2494
Схема а	102,0	108,0	114,0	119,7	125,0	131,0	136,0
Схема б	24,5	25,9	27,3	28,7	30,0	31,3	32,6

Побудуємо відповідні графіки залежності. На рисунку 12 показано графік максимального переміщення деталі залежно від подачі на оберт, а на рисунку 13 – залежно від осьової сили різання. При цьому ряд 1 відповідає обробці за схемою а, ряд 2 – обробці за схемою б.

Аналіз графіків показує, що максимальне зміщення деталі при свердлінні отвору збільшується зі збільшенням подачі і, відповідно, осьової сили різання. Також видно, що при обробці за схемою *а* сила різання більше впливає на величину деформації. Крім того, номінальне значення переміщення теж значно вище, орієнтовно вдвічі, і зі збільшенням подачі ця різниця зростає.

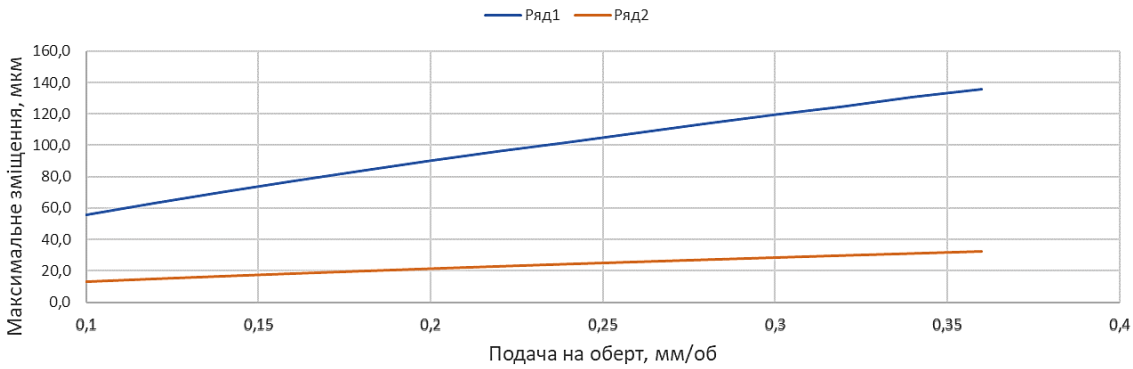


Рис. 12. Графік максимального переміщення деталі залежно від подачі на оберт
Джерело: розроблено авторами.

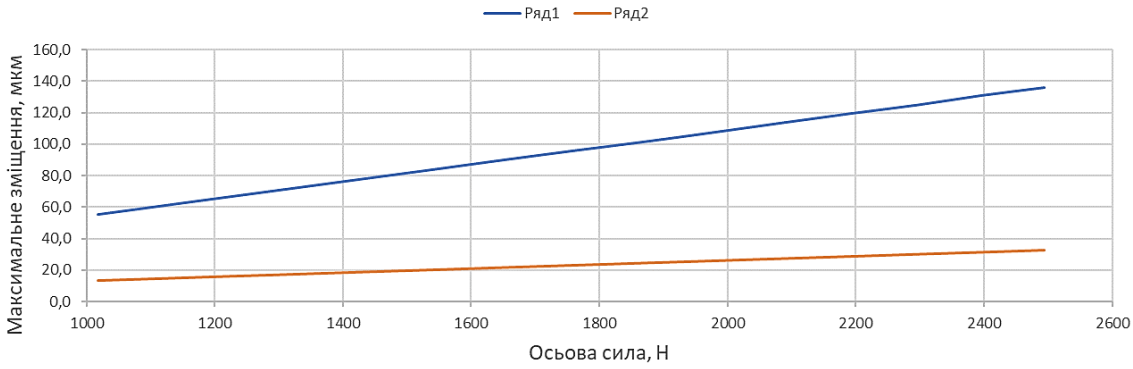
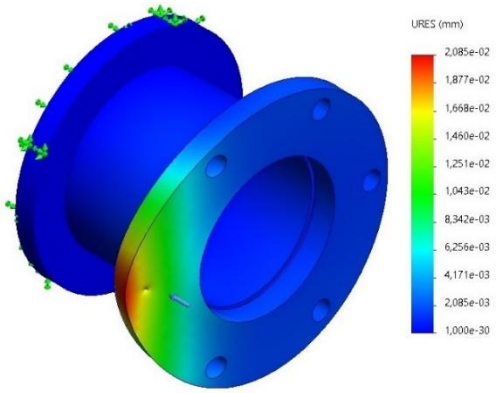


Рис. 13. Графік максимального переміщення деталі залежно від осьової сили різання
Джерело: розроблено авторами.

Отже, з рисунків 12, 13 видно, що схема обробки, а саме послідовність виконання операцій значним чином впливає на жорсткість деталі і її миттєве зміщення в процесі обробки, відповідно – і на точність виконання отвору.

Додатково перевіримо, чи впливає наявність вже виконаних отворів на точність наступних. Проведемо аналогічне статичне дослідження для випадку обробки останнього 6-го отвору. При цьому схема закріплення, напрям дії сили різання та генерація сітки скінченних елементів здійснюється аналогічно попереднім дослідженням (рис. 8).

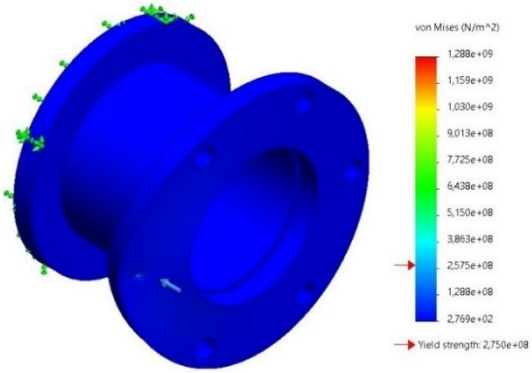
Результати статичного аналізу, а саме карта зміщень Displacement зображена на рис. 14, діаграма розподілу напружень Von Mises Stress – на рис. 15, та еквівалентних деформацій Equivalent Strain – на рис. 16.



Min = 0,000e+00mm, Max = 2,085e-02mm

Рис. 14. Переміщення заготовки при обробці останнього отвору

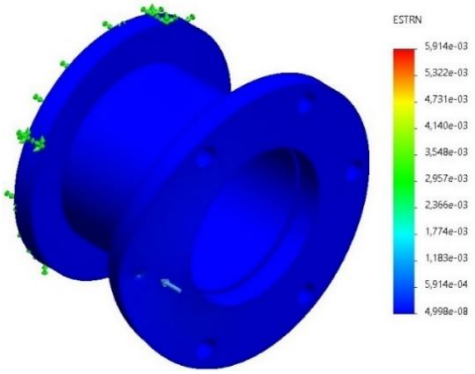
Джерело: розроблено авторами.



Min = 2,769e+02N/m^2, Max = 1,288e+09N/m^2

Рис. 15. Розподіл напружень (Von Mises Stress) при обробці останнього отвору

Джерело: розроблено авторами.



Min = 4,998e-08, Max = 5,914e-03

Рис. 16. Еквівалентні деформації (Equivalent Strain) при обробці останнього отвору

Джерело: розроблено авторами.

Порівнявши результати розрахунку процесу свердління останнього отвору з першим за схемою б (рис. 9, 10, 11), видно, що показники змінились несуттєво. Так, наприклад, максимальне переміщення точки деталі для останнього отвору становить 20,85 мкм, а для першого – 20,32 мкм, тому різницю в 0,53 мкм можна вважати несуттєвою. Однак у випаду обробки таких деталей з більшими вимогами до точності, є доцільним зменшувати подачу на оберт для кожного наступного отвору.

Висновки. У роботі розглянуто особливості процесу свердління отворів у торцевій поверхні корпусної деталі. Розраховано режими різання, побудовані графіки залежності крутного моменту, сили різання та часу обробки залежно від подачі на оберт. Показано, що при збільшенні подачі підвищується продуктивність, що є позитивним, однак разом із тим збільшується і сила різання, що приводить до відтискання та деформації деталі в процесі свердління і негативно впливає на якість отвору. Досліджено два варіанти свердління отворів: при їх утворенні в готовій деталі та у випадку цілеспрямованого залишення припуску на торцевій поверхні з метою підвищення жорсткості фланця. Шляхом проведення статичного аналізу в системі SolidWorks з'ясовано, що величина відтискання деталі значним чином залежить від товщини фланця, і при її збільшенні величина пластичної деформації в зоні свердління зменшується, при цьому час виконання отворів майже не змінюється. Порівняльний аналіз обробки першого та останнього отворів показує, що жорсткість деталі зменшується з утворенням кожного наступного отвору, однак суттєвого впливу на величину пружного відтиску деталі не має,

і в загальному випадку відсутня необхідність корегування режимів різання. Методика, описана в дослідженні, може бути використана при визначенні послідовності обробки елементів корпусних деталей з метою покращення точності та підвищення продуктивності.

Список використаних джерел

1. Нікітюк, М. В. (2021). *Аналіз впливу технологічних факторів на точність розмірів між осями головних отворів корпусних деталей і базовими площинами, що забезпечуються розточуванням на багатоцільовому верстаті*. У Всеукраїнській науково-практичній Інтернет-конференції студентів, аспірантів та молодих науковців «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи» (МН-2021), 1–14 травня 2021 р. Вінниця, Україна: ВНТУ. https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/45517.

2. Пуховський, Є. С., Фролов, В. К., Приходько, В. П., & Бецко, Ю. М. (2023). Технологічні проблеми виготовлення корпусних деталей хімічних машин та апаратів. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів, 4*(50), 92–103. https://doi.org/10.32845/msnau.2022.4.13.

3. Кушнірчук, А., Ткачук, В., & Харжевський, В. (2023). Дослідження впливу геометрії інструменту та режимів різання на точність оброблення деталей, отриманих FDM-друком. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 329*(6), 217–222. https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-329-6-217-222.

4. Кальченко, В., Кологойда, А., Пасов, Г., Сіра, Н., Зюзько, Д., & Пивовар, Д. (2023). Сучасні 3D-технології в машинобудуванні та автомобільному транспорті. *Технічні науки та технології, (2)32*, 33–41. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-33-41.

5. SolidWorks. (n.d.). *Офіційний вебсайт компанії*. https://www.solidworks.com/

6. Drilling Solid Tools. (n.d.). *Електронний каталог різального інструменту*. ISCAR. https://www.iscar.com/eCatalog/Item.aspx?cat=6154787&fnum=4008&mapp=DR&app=501&GFSTYP=M&isoD=1.

7. Бараускєне, О. І., Киричок, П. О., & Зигуля, С. М. (Уклад.). (2021). *Основи технології поліграфічного машинобудування*. КПІ ім. Ігоря Сікорського. 94 с.

References

1. Nikityuk, M. V. (2021). Analiz vplyvu tekhnolohichnykh faktoriv na tochnist rozmiriv mizh osiamy holovnykh otvoriv korpusnykh detalei i bazovymy ploshchynamy, shcho zabezpechuiutsia roztochuvanniam na bahatotsilovomu verstati [Analysis of technological factors affecting the accuracy of distances between axes of main holes and base planes in housing parts processed on multifunctional machines] [Conference paper]. *U Vseukrainskii naukovo-praktychnii Internet-konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodykh naukovtsiv «Molod v nautsi: doslidzhennia, problemy, perspektyvy»All-Ukrainian Scientific and Practical Internet Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists "Youth in Science: Research, Problems, Prospects"*, Vinnytsia National Technical University. https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/45517.

2. Pukhovskyi, Y. S., Frolov, V. K., Prykhodko, V. P., & Betsko, Y. M. (2023). Tekhnolohichni problemy vyhotovlennia korpusnykh detalei khimichnykh mashyn ta aparativ [Technological problems of manufacturing housing parts of chemical machines and apparatuses]. *Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Seriia: Mekhanizatsiia ta avtomatyzatsiia vyrobnychykh protsesiv* – Bulletin of Sumy National Agrarian University. Series: Mechanization and Automation of Production Processes*, 4(50)*, 92–103. https://doi.org/10.32845/msnau.2022.4.13.

3. Kushnirchuk, A., Tkacuk, V., & kharzhevskyi, V. (2023). Doslidzhennia vplyvu heometrii instrumentu ta rezhymiv rizannia na tochnist obroblennia detalei, otrymanykh FDM-drukom. [Study of the influence of tool geometry and cutting modes on the accuracy of processing parts obtained by FDM printing]. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences,* 329(6), 217-222. https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-329-6-217-222.

4. Kalchenko V., Kolohoida A., Pasov G., Sira N., Zyuzko D., Pivovar D. (2023). Suchasni 3D-tekhnolohii v mashynobuduvanni ta avtomobilnomu transporti. [Modern 3D technologies in engineering and road transport.] *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical Sciences and Technologies,* (2(32)), 33-41. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-33-41.

5. Ofitsiinyi veb-sait: Solidworks Company. https://www.solidworks.com/.

6. Elektronnyi kataloh rizalnoho instrument: Drilling Solid Tools. https://www.iscar.com/eCatalog/Item.aspx?cat=6154787&fnum=4008&mapp=DR&app=501&GFSTYP=M&isoD=1.

7. Barauskiene, O. I., Kyrychok, P. O., & Zyhulia, S. M. (2021). *Osnovy tekhnolohii polihrafichnoho mashynobuduvannia [Electronic resource: textbook for students of specialty 186 "Publishing and Printing"]*. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.

Дата першого надходження статті до видання: 01.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.12.2025

UDC 621.914

Volodymyr Kalchenko[1], Antonina Kolohoida[2], Nataliia Sira[3], Genadiy Pasov[4], Vira Murashkovska[4], Vladislav Leheda[6]

[1]Doctor of Technical Sciences, Professor Department of Road Transport and Industrial Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: vvkalchenko74@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/ 0000-0002-9072-2976. **ResearcherID:** G-6752-2014

[2]PhD, Department of Road Transport and Industrial Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: kolohoida@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-1742-2686. **ResearcherID:** I-1118-2014

[3]PhD, Department of Road Transport and Industrial Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: nnseraya@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-6242-5210. **ResearcherID:** K-2658-2017

[4]PhD, Department of Road Transport and Industrial Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: genapasov@gmail.com. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0001-7248-9085. **ResearcherID:** H-4455-2014

[5]Senior Lecturer of the Department of Road Transport and Industrial Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: vmurashkovska@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-0556-8709. **ResearcherID:** G-9757-2016

[6]student of higher education, gr. MMB-221
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: vladislavleheda@gmail.com

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF MACHINING SEQUENCE ON THE ACCURACY OF A HYDRAULIC DRIVE PART USING THREE-DIMENSIONAL MODELING

In modern manufacturing conditions, a key criterion for production quality is achieving the desired part within the shortest possible time and with minimal production costs. Therefore, the study of the influence of the sequence of technological operations and the selection of machining parameters is highly relevant and enables optimization of manufacturing processes.

The production of parts with complex geometries requires the integration of various operations. At the stage of determining the manufacturing sequence, it is essential to consider multiple factors that ensure the required quality of the part while maximizing production efficiency.

A significant part of research has been devoted to the study of machining processes for housing-type components. The influence of technological datum selection on product accuracy has been investigated, and the mechanical characteristics of various blanks have been analyzed.

However, the impact of the manufacturing sequence on part accuracy has not yet been thoroughly explored.

The primary objective of this study is to examine how the sequence of technological operations in the production of a housing-type part affects machining accuracy.

This work analyzes the specifics of the drilling process for holes located on the end surface of a housing component. Cutting parameters were calculated, and graphs were constructed to show the dependence of torque, cutting force, and machining time on feed per revolution. It was demonstrated that increasing the feed rate enhances productivity, but also raises cutting forces, which negatively affects hole quality due to deflection and deformation of the part during drilling.

Two drilling scenarios were investigated: drilling holes in a finished part, and drilling with a deliberately retained machining allowance on the end surface to increase flange rigidity. Through static analysis in SolidWorks, it was found that the degree of part deflection significantly depends on flange thickness. As the thickness increases, plastic deformation in the drilling zone decreases, while the time required to complete the holes remains nearly unchanged.

Keywords*: manufacturing technology; drilling; precision; modeling; finite element method.*

Fig.: 16. Table: 2. References: 7.

Кальченко В. В., Кологойда А. В., Сіра Н. М., Пасов Г. В., Мурашковська В. П., Легеда В. А. Дослідження впливу послідовності обробки деталі гідравлічного приводу на її точність з використанням тривимірного моделювання. *Технічні науки та технології*, 2026. № 1(43). С. 9-21. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-9-23.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-22-33
УДК 004.03

Євгеній Юрійович Сахно

доктор технічних наук, професор кафедри геодезії, картографії та землеустрою
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна).
E-mail: evsakhno@ukr.net. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-9789-7242. **SCOPUS ID:** 57190493489

КОНЦЕПЦІЯ ВЗАЄМОДІЇ ПРИРОДНИХ І ШТУЧНИХ СИСТЕМ

У науковій статті наведені дослідження процесів взаємодії природних і штучних систем, запропоновано механізм їх трансформації, який дозволяє визначити природу їхнього поєднання та знайти підходи до управління процесом створення та закріплення корисних ознак в середовищі існування людської цивілізації. Розглянуто обмін між енергетичними потенціалами та створення інтегрованої, сумісної системи на підставі моделі взаємодії природних і штучних систем, а своєю чергою сумісна система є ланкою в їхньому переході на новий, вищий ступінь розвитку. Головною рисою запропонованої моделі є застосування теорії потоків енергії та апарату диференціальних рівнянь, які описують стійкість систем та зміни їхніх параметрів із часом, а розв'язком таких рівнянь є фазові траєкторії, що визначають рух систем у просторі, й відповідно, вектор їхнього зростання.

Ключові слова: *природні системи; штучні системи; взаємодія; фазові траєкторії.*
Рис.: 7. Табл.: 1. Бібл.: 9.

Єдина відмінність між часом і будь-яким із
трьох просторових вимірів полягає в тому,
що наша свідомість рухається вздовж нього.
Г. Дж. Уэлс

Актуальність теми. Процес розвитку природних систем на планеті Земля характеризується зростанням потенціалу людського суспільства відповідно до його потреб та викликами перед навколишнім простором. Відомо, що еволюція завдяки природному відбору є випадковою, при цьому трапляються мільйони мутацій, з яких корисними виявляються одиниці, і як наслідок, механізм еволюції завдяки природному відбору має досить повільний характер – мусять змінитись десятки поколінь, перш ніж корисна ознака закріпиться в популяції. Проте людству для виживання на планеті потрібне зменшення часу для появи корисної ознаки того чи іншого природного явища, і вирішенням таких завдань мають слугувати штучні системи [1; 2].

Постановка проблеми. Відомо, що штучні системи визначаються як системи, які утворюються і розвиваються безпосередньо людьми, або можуть являти собою будь-які матеріальні продукти і технології, сотворені людьми. Проте коли хоча б один елемент був цілеспрямовано змінений чи створений людиною, систему можна вважати штучною, і якщо брати до уваги середовище, що оточує сучасну людину, з погляду викладеного підходу, то людство існує у практично створеному штучному світі. У процесі еволюції цивілізації створювався і розвивався певний «кокон» штучних систем, що охоплював кожну людину, групи людей, а також усе людство загалом [1]. Водночас підґрунтям сучасної теорії створення штучних систем є еволюційне моделювання, яке можна визначити як відтворення процесу природної еволюції за допомогою спеціальних комп’ютерних програм. Чинники, що визначають неминучість еволюції, містять:

- спадкову мінливість як передумову еволюції, її матеріал;
- боротьба за існування як керуючий та спрямовуючий фактор;
- природний відбір як перетворюючий чинник.

Сучасна теорія еволюції спирається на теорію загальної і популяційної генетики; у популяціях відбуваються мікроеволюційні процеси, що ведуть до зміни їхнього генофонду, трансформації генетичного складу популяції. До ключових напрямів розвитку еволюційного моделювання на сучасному етапі можна віднести такі:

• генетичні алгоритми (ГА), призначені для оптимізації функцій дискретних змінних, які призначені для оптимізації функцій дискретних змінних, у яких використовуються аналогії природних процесів рекомбінації та відбору;

© Є. Ю. Сахно, 2026

• системні класифікації (КС), сформовані на основі генетичних алгоритмів, які застосовуються як системи контролю навчання;

• генетичне програмування (ГП), засноване на використанні еволюційних методів удосконалення створюваних комп'ютерних програм;

• еволюційне програмування (ЕП), спрямоване на оптимізацію неперервних функцій без застосування рекомбінацій;

• еволюційні методи (ЕМ), на які націлена оптимізація неперервних функцій за допомогою рекомбінацій.

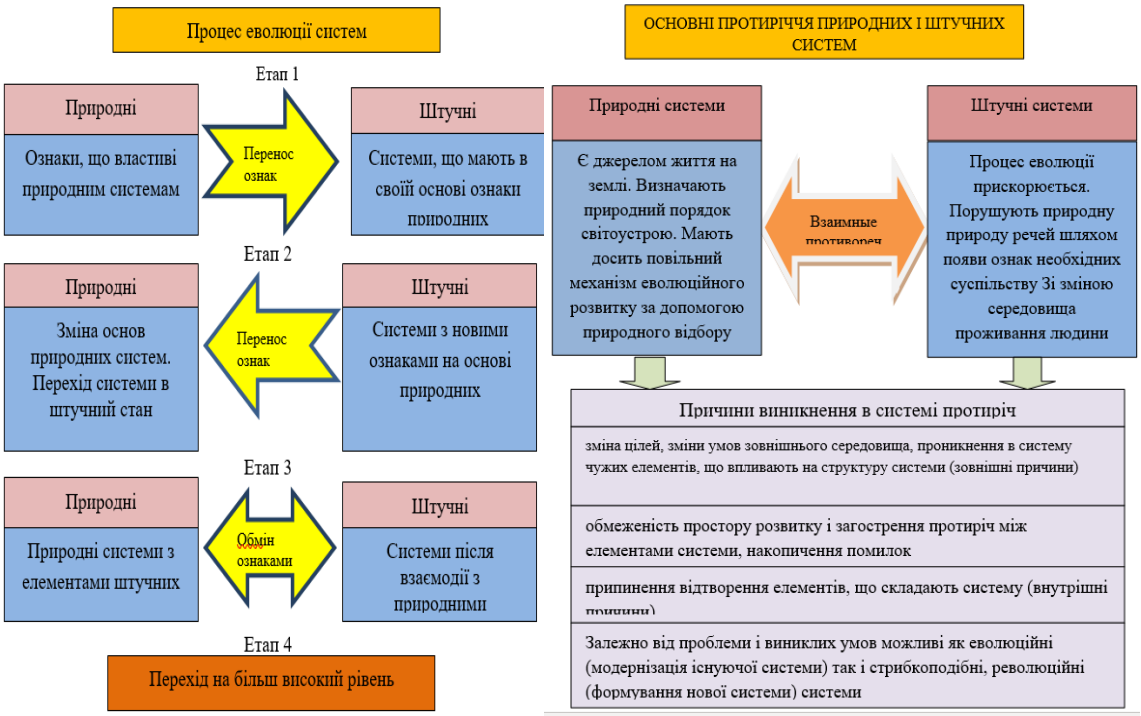
Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [3] розглянуто ключові поняття та основні положення теорії систем, а також методи системного аналізу. Особливий акцент зроблено на застосуванні сучасних комп'ютерних технологій для моделювання систем у межах системного аналізу. У монографії [4] авторами розглянуто виявлені закономірності розвитку штучних систем. Проаналізовано етапи еволюції ряду нетехнічних систем, зокрема, на їхніх прикладах підтверджено гіпотезу Г. С. Альтшуллера про ймовірне існування універсальних законів розвитку будь-яких штучних систем. Також сформульовано основи теорії розвитку штучних систем (ТРШС) як складової частини загальної теорії систем. У працях [5; 6] наведено сучасне бачення ключових теоретичних основ екосистемології. Дослідник розглядає теоретичні й практичні аспекти будови та роботи природних систем, різних видів їхньої зміни й математичного моделювання, а також глобальних напрямків опису різноманітності. Розглянуто головні аспекти сучасної класифікації екосистем, стисло охарактеризовано недоліки та переваги деяких з них. Проаналізовано розмаїття природних систем і запропоновано фрагмент уніфікованої класифікації на прикладі регіонального ландшафтного парку. У роботі [7] визначено сутність природних і штучних екосистем і відмінності між ними.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Еволюційні методи доречно застосовувати в тих випадках, коли прикладну задачу складно викласти у формі, що дозволяє отримати аналітичне розв'язання, або коли потрібно завчасно знайти приблизний результат. А для успішного розвитку штучних систем потрібне глобальне економічне зростання, і країнам, які прагнуть до лідерства в багатополярному світі, варто створити продукт, який матиме попит на довгі роки, здійснюючи прориви в тих галузях, які здатні очолити всю світову економіку. У найближчі роки сформується низка продуктів, яка докорінно змінить ринок; системи штучного інтелекту, що створюються або вже застосовуються, 3D-системи, біо-, нано-, кріо-, робототехніки, екотехнології, що сприяють трансформації та розвитку штучних систем. Усе це призведе до того, що країни, які стануть носіями цих технологій, опиняться серед світових лідерів, а ті, хто гає з розробкою штучних систем, не знайдуть своїх споживачів та відстануть на чимало років.

Мета роботи. Це дослідження присвячено вивченню процесів взаємодії природних та штучних систем, динаміки їх розвитку та обміну енергетичними потенціалами з метою виявлення механізму їх інтеграції та переходу систем на вищий рівень розвитку. Також важливим питанням цієї роботи є моделювання процесів їх взаємодії з використанням теорії потоків енергії та комплексу диференціальних рівнянь для визначення фазових траєкторій руху систем у просторі та часі.

Результати досліджень. Досліджуючи історію техніки, можна припустити уявну випадковість появи того чи іншого винаходу чи всього процесу розвитку техніки [4; 8], але є тісний зв'язок між випадковими та природними процесами розвитку. Науковці з усього світу намагаються стерти межу між штучними й живими організмами, аби створити роботів, здатних самостійно виробляти собі подібних. При цьому процес переходу від природних до штучних систем можна поділити на чотири етапи (рис. 1, *а*). Слід також зауважити, що описана теорія доволі спрощена й не бере до уваги величезний спектр обмежень, які накладаються на процес еволюції. Вивчаючи механізми руху систем та

їхніх частин, можна навчитися спрямовувати процес розвитку та взаємодії природних і штучних систем, зберігаючи таким чином розумну рівновагу в поступі людства під час переходу на новий рівень зростання. На першому етапі відбувається перенесення ознак з природних систем у сферу штучних, де на основі наявних характеристик природних систем формуються штучні.



а *б*

Рис. 1. Процес еволюції природних і штучних систем:
а – схема взаємодії систем;
б – основні суперечності природних і штучних систем

Однак у зв'язку з розвитком науково-технічного прогресу людство на основі наявного технологічного арсеналу шукає можливості змінити природну основу речей. Такі технології, як генна інженерія, управління природними явищами, створення штучного інтелекту дало поштовх до зміни самої основи створеного природою середовища проживання людини. У цьому випадку можна виділити другий етап взаємодії природних і штучних систем, коли людина безпосередньо своїми діями змінює природні закони, і в цьому випадку природні системи втрачають своє первісне призначення (свої вихідні функції), перетворюючись, по суті, у штучні з окремими елементами природних систем. Проводячи такий технологічний уклад життя, в оточенні втрачається (стирається) межа між двома системами. Людство опиняється у світі, який створено штучно, в залежності від його бажання (і значною мірою від його егоїстичних забаганок). Таким чином, ми наближаємося до третього етапу взаємодії природних (змінених людиною), але, по суті, неприродних систем з новоствореними технологічними об'єктами.

У цьому випадку коло руху замикається і інтегрована система виходить на новий, вищий рівень розвитку, де рух повторюється. Вважаємо, що цей процес відбуватиметься доти, поки в навколишньому середовищі залишаться природні системи з початковими ознаками, створеними природою спочатку. З часом людство практично повністю змінить свою природу, а може й форму існування, залежно від потреби суспільства або своїх егоїстичних прагнень. Проте, вивчаючи механізми руху систем та їхніх елементів, можна

навчитися керувати процесом еволюційної взаємодії природних та штучних систем, таким чином дотримуючись раціонального балансу розвитку людства при переході на новий рівень розвитку.

На рис. 1, *б* показані головні суперечності, що виникають у процесі взаємодії природних і штучних систем, які полягають у тому, що природні системи розвиваються за власними еволюційними законами з доволі тривалим періодом появи потрібної ознаки системи. Штучні системи мають коротший період появи необхідної ознаки, проте вони призводять до глобальної зміни навколишнього простору з невизначеними наслідками таких дій. Проведені попередні дослідження дозволили з'ясувати, що еталоном взаємодії штучних та природних систем є галузь яка близька та улюблена автором даного наукового дослідження – галузь промислової гідравліки та пневматики, де в ролі штучних систем виступають машини та механізми, а природним є елемент передачі енергії у вигляді природного мастила, води та повітря, що пов'язано з тим, що закони гідравліки діють як у природі, так і у створених людиною пристроях. Наприклад, гідравлічні та пневматичні системи можуть бути природними (природні гідродинамічні об'єкти, океани та моря, геотермальні джерела, водопровідна система коренів дерев, кровообіг у живих організмах або атмосферні процеси) та штучними (пристрої та механізми, що створені людиною). Природні системи використовують рідини або гази для виконання функцій, тоді як штучними є гідросилові пристрої, механізми, які використовують гідравлічну енергію для передачі механічної, що відбувається під час роботи машин, автоматизації процесів виробництва. На рис. 2 представлена взаємодія штучних та природних систем гідравліки та пневматики, яка створена штучним інтелектом. Крім того, штучні та природні мастила дозволяють перетворювати енергію потоку рідини в кінетичну енергію вала, що обертається, і цей ефект використовуються в різних галузях, включаючи машинобудування, енергетику, сільське господарство, будівництво та інших.

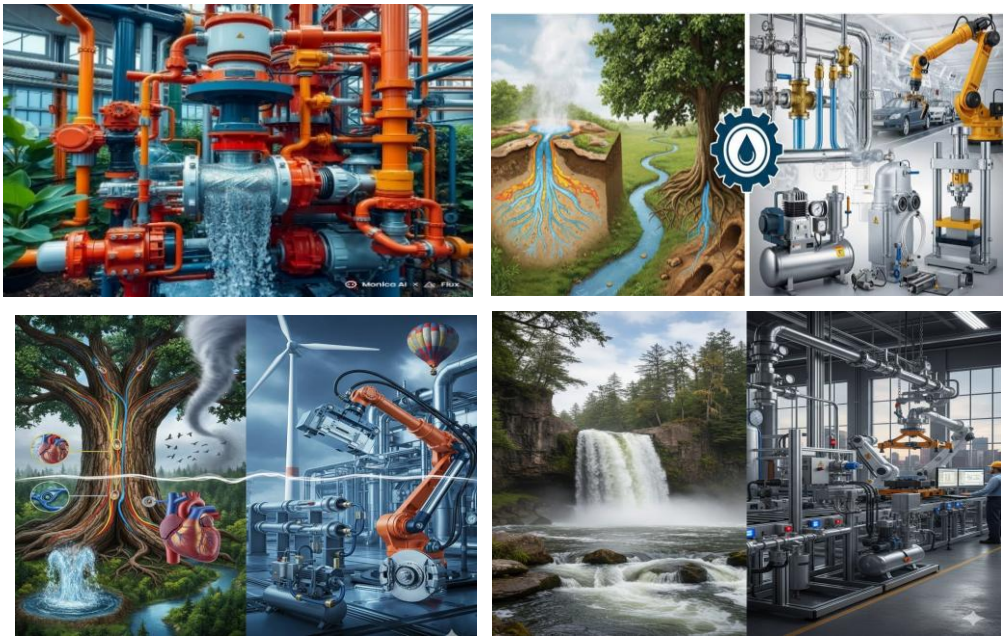


Рис. 2. Зображення природні та штучні системи гідравліки та пневматики, яке створено ШІ

Процес взаємодії між природними та штучними системами представлений на рис. 3, і щоб розкрити процес взаємодії між взаємними об'єктами, необхідно:

1) простежити механізми взаємодії між системами у зв'язку з характеристиками їхніх енергій;

2) виявити особливості злиття точок біфуркації та синергічного ефекту взаємодії систем.

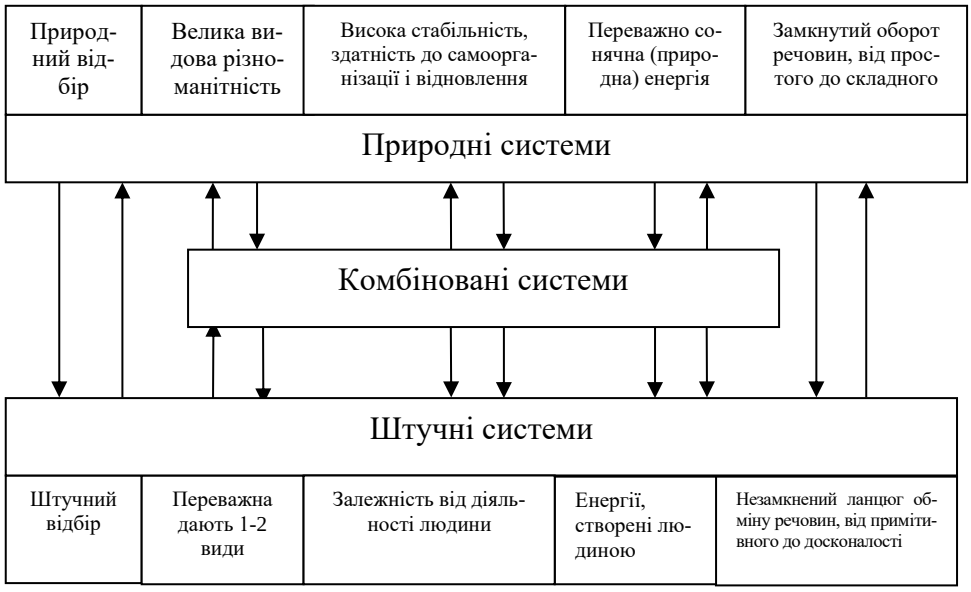


Рис. 3. Схема взаємодії штучних та природних систем

На основі створеної схеми взаємодії штучних та природних систем (рис. 3) розглянемо питання їх інтеграції та обмін ознаками при їхньому розвитку і формуванні єдиної комбінованої системи [9]. Приймемо, що інтеграція систем буде неповною, і загалом системи будуть функціонувати індивідуально і контактувати лише в точках їх дотику. Розглянемо випадок, коли енергетичний потенціал системи розподілений вздовж границі, яка визначає параметри системи (рис. 4, *а*), у результаті руху систем назустріч одна до одній зі швидкостями V_1 та V_2, (рис. 4, *б*) відбувається їх взаємопроникнення і утворюється область x_0, (зі станом рівноваги oo'), де відбувається їх злиття та об'єднання з можливими синергетичними ефектами. У реальних умовах енергія систем розподілена вздовж їхніх границь нерівномірно, а в деяких випадках - хаотично. Тому в залежності від існуючих законів розподілу енергії будуть формуватися виступи та западини на поверхні систем. У цьому випадку при зустрічному русі двох систем зі швидкостями V_1 та V_2 можуть формуватися різні конфігурації області x_0, за параметрами яких можна робити висновки про процеси інтеграції та кінцеві результати їх сумісної діяльності.

Розглянемо деякі типові випадки (рис. 4,б,в), коли в результаті взаємопроникнення (дифузії) потоків енергії, об'єднуються виступи систем з площами S_1, S_2, S_3 (рис. 4,б), де енергетичні потоки доповнюють одне одного та утворюють точки біфуркації на основі принципів синергізму [9]. Тут також виникають області з площами F_1 та F_2, де чітко виражені енергетичні потенціали відсутні. У цьому випадку виникають локальні енергетичні порожнини, які негативно впливають на загальну допустиму область x_0, у результаті чого її площа зменшується. Альтернативний варіант, коли виступи та западини двох систем збігаються (рис. 4, *б*). У цьому випадку енергетичний простір заповнюється повністю. Цікавим є випадок, коли енергетичні потенціали однополюсні, тоді виступ із більшим потенціалом може зруйнувати виступ із меншим потенціалом і виникає локальний енергетичний потенціал 1, а енергія буде розсіюватися в деякій області x_p, доповнюючи суміжні енергетичні смуги (рис. 4, *в*).

Унаслідок руху компонентів системи стається впорядковане перерозподілення енергетичних потоків через зіткнення великої кількості мікроскопічних часток, що ґрунтується на базових системних засадах, притаманних добре організованим об'єктам будь-якого походження.

Математичну модель роботи системи за теорією потоку можна подати рівняннями балансу щодо змінних стану. Інтегральне рівняння балансу для будь-якого досліджуваного часового інтервалу (t_o, t_N) буде:

- для статистичних систем рівняння балансу:

$$U = UA + Y, \quad (1)$$

- для динамічних систем рівняння запишемо в такому виді:

$$X(t_N) = X(t_0) + U(t_0, t_N) - Y(t_0, t_N) \pm K(t_0, t_N)., \quad (2)$$

де U – енергія, що входить у систему; Y – енергія, що виходить із системи; A – матриця коефіцієнта; t_0, t - досліджувані інтервали; X – змінний стан системи; U – вхідні параметри; K - коефіцієнт, що з'явилася в результаті діяльності системи.

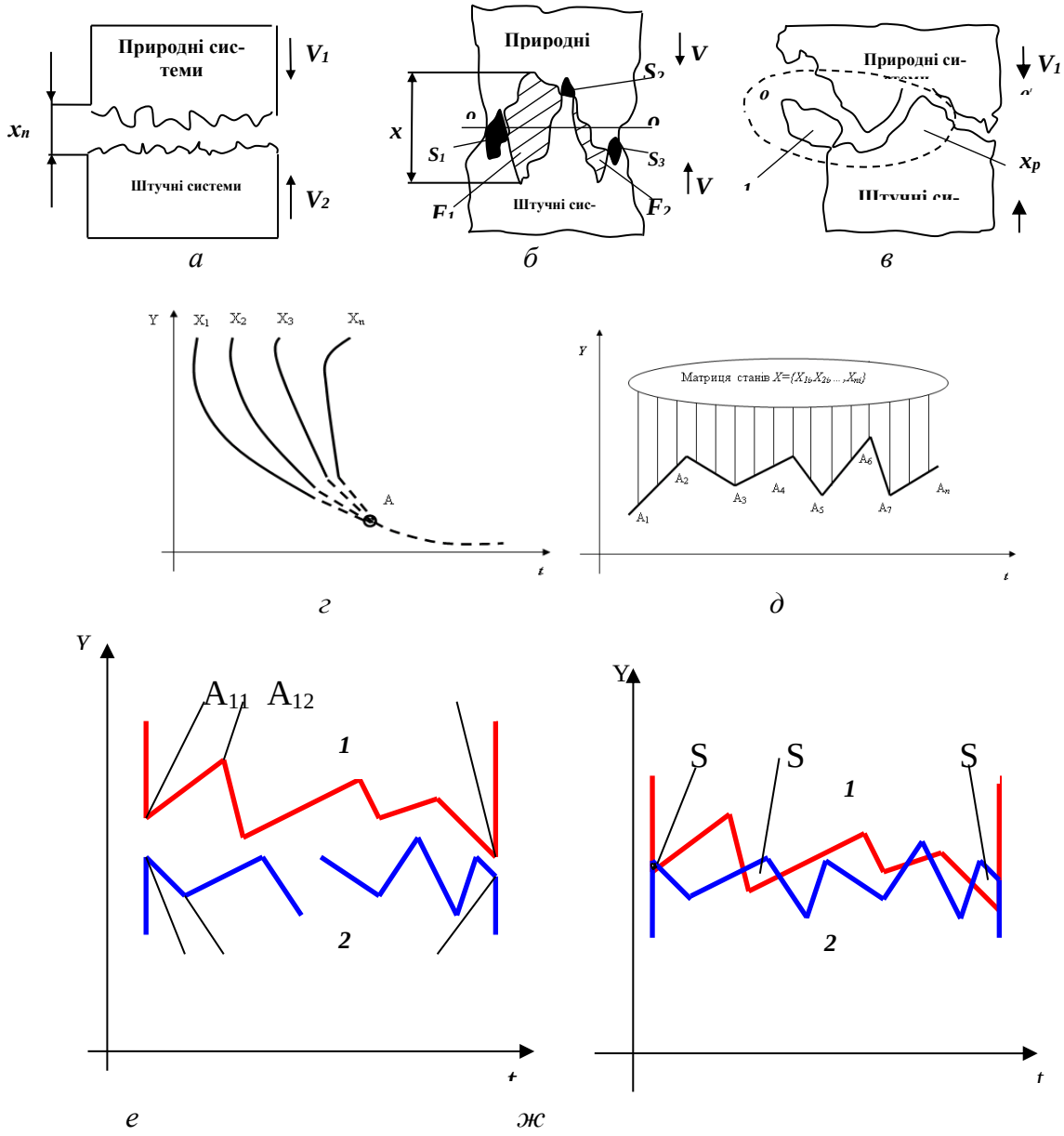


Рис. 4. Схема інтеграції штучних та природних систем:
а – початковий стан
систем; б – взаємопроникнення двох систем; в – заповнення енергетичних просторів:
г – фазові траєкторії у просторі станів (А-атрактор типу «центр») та інтеграція систем; д – динамічний розподіл станів; е) до взаємодії; ж – після взаємодії;

Найбільш доцільним для дослідження теорії систем є апарат диференціальних рівнянь, який описують зміни системи в часі у вигляді:

$$\frac{dY}{dt} = f(X, B, t), \tag{3}$$

де $X=\{X_1,X_2,.....,X_n\}$ – вектор залежних змінних, які описують стан системи; $\frac{dY}{dt}$ - швидкість зміни факторів системи; $f(X, B, t)$ - нелінійна вектор-функція; $B=\{b_0,b_1,b_2,....,b_n\}$ – вектор параметрів системи, в загальному випадку залежних від часу. Розв'язки рівнянь виду (3) звичайно представляють фазовими траєкторіями в просторі станів системи (рис. 4).

Аналіз фазових шляхів дозволяє зробити висновки про розвиток систем у часі, визначити зони детермінованої поведінки та зони біфуркацій (зони невизначеності та зони нестійких станів системи), а також атрактори системи (зони стійких станів, наприклад, типу «центр») [9]. Переважно перехід від стабільного стану до нестабільного (і навпаки) трапляється при зміні параметрів b_i системи (3), які можна назвати «керівними параметрами». Завдання аналізу стану можна сформулювати так: визначення таких параметрів, за допомогою яких можлива зміна поведінки системи та її станів чи керівних параметрів, що визначають стійкість до зовнішніх впливів. Розглядаючи поведінку системи в множині станів, можна говорити про наявність множини точок біфуркації $A=\{A_1,A_2,....,A_n\}$. Це означає, що функція поведінки системи (рис. 4, г,д) описується у просторі станів у вигляді загальної траєкторії з розподіленими у часі точками біфуркації чи атракторами та площами перетину систем S_1…..S_N (рис. 4, *е, ж*) [9]. Визначені в таких точках параметри управління чи «параметри порядку» утворюють матрицю $B=\{B_1....,B_n\}$, за допомогою якої можна оцінювати стійкість (нестійкість) системи. Тоді на вказаній множині станів система може бути описана системою диференціальних рівнянь виду (3) з врахуванням кількості станів. Якщо в системі відомий (заданий) її початковий стан $X(t_0)$, то існує єдиний розв'язок рівняння (3), за допомогою якого можна визначити прогнозні значення станів системи для будь-яких $t > t_0$. Якщо число змінних (станів) два або більше, то система може бути описана системою 2-х і більше рівнянь виду:

$$\begin{cases} \frac{dY_1}{dt} = f_1(X_1, X_2, B_1); \\ \frac{dY_2}{dt} = f_1(X_1, X_2, B_{21}); \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ \frac{dY_n}{dt} = f_{n1}(X_1, X_2, B_n), \end{cases} \tag{4}$$

де $B_1, B_2, \ldots B_n$ – параметри стійкості системи.

Розглядаючи загальну систему людства та культуру людської цивілізації, хотів би вашу увагу звернути на науково-фантастичний роман, детектив американського письменника Айзека Азімова «Сталеві печери» (англ. The Caves of Steel) з циклу творів «Роботи», 1954 р. (рис. 5, *а*). На основі цих творів створено відомий науково-фантастичний фільм «Я, робот» (англ. *I, Robot*) 2004 року режисера Алекса Пройаса, з Віллом Смітом у головній ролі, де показано «Три закони робототехніки» в майбутньому, де роботи стали повсюдною частиною людського життя (рис. 5, *б*). У цьому романі показано, що вуглець є основою людини (близько 21 %), а залізо – елементи робота. Тому співвідношення:

$$C/Fe \tag{5}$$

символізує зв'язок живої та неживої природи, штучних та природних систем, культуру, яка поєднує в собі найкращі якості обох систем, але паралельній основі.

а *б* *в*

Рис. 5. Структура людської цивілізації:
а – обкладинка роману «Сталеві печери»;
б – кадр з блокбастера «Я робот»; в – хімічна структура людської цивілізації

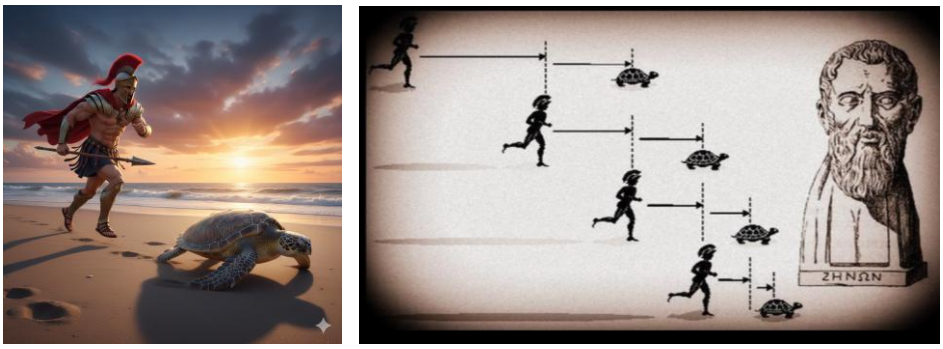
Адаптуючи цю теорію до умов суспільного розвитку, хотілося б визнати її раціональною основою існування людської цивілізації. Але, розглядаючи цю теорію на сучасному етапі еволюції, вважаю правильним додати до неї клас полімерних, легко формованих матеріалів, з яких можна виготовляти тверді, міцні, стійкі до корозії вироби. Ці речовини складаються переважно з вуглецю C, водню H, кисню O, азоту N. Тепер можна з упевненістю сказати, що високомолекулярні сполуки підкорили людство, тому сучасну культуру цивілізації можна описати такими основними хімічними елементами (рис. 4, *в*):

$$C/Fe/H/N/O/?. \quad (6)$$

На цій діаграмі в порожньому секторі спеціально розміщений знак питання як символ майбутніх хімічних елементів (уже існуючих або новостворених), які доповнять або замінять існуючу культуру цивілізації. Отже, теорія взаємозв'язку природних і штучних систем, живої та неживої природи продовжить свою еволюцію та рух у напрямку розвитку людського суспільства.

Ґрунтуючись на цій елементній базі, розглянемо процес створення технічних систем та їхніх елементів, опис яких може мати декілька варіантів, тому проаналізуємо чотири з них (табл. 1). У рядку 1 табл. 1 показано варіант створення спочатку технічної системи, а потім під її структуру елементної бази. Умовно цей процес можливо представити у вигляді людини, яка наздоганяє потяг, тобто структура системи створена, чи вже вдосконалюється, а потім підбирається елементна база. Такий порядок дій у вигляді готового будинку, під який підбирають його конструкції, та алгоритм створення системи показано у рядку 1. У рядку 2 (табл. 1) наведено паралельний варіант створення системи (людина бежить поряд з потягом). Множина елементів, порядок дій у вигляді будівлі та алгоритм створення системи наведено там само. У варіанті 3 спочатку відбувається створення елементів системи, а потім з них будується її структура (умовно представлено, як людину наздоганяє потяг). Порядок дій створення системи, приналежність множин її елементів та відповідний алгоритм наведено в стовпчиках 4 та 5. І четвертий варіант, у якому умовно представлено комбінаторика варіантів 1, 2, 3 (людина та потяг можуть рухатися в будь-якому напрямку, що відображають кути α_1 і α_2). Крім того, елементи однієї системи можуть бути також елементами іншої, і навпаки, а знов створені елементи можуть не підходити за технічними характеристиками до системи, що проєктується. Порядок дій та алгоритм створення системи наведено в рядку 4. І якщо в цьому процесі виділяти окремо штучні та природні системи, то опис процесів їх взаємодії значно ускладняється.

При цьому в процесі проєктування виникає відомий парадокс Зенона «Ахіллес і черепаха» (рис. 6).



а б

Рис. 6. Парадокс Зенона «Ахіллес і черепаха»: а – рисунок, що згенеровано за допомогою ШІ; б – схема для математичного опису

Звідки випливає, що швидкий Ахіллес ніколи не зможе наздогнати черепаху. Нехай на початку руху їх розділяє відстань a, і Ахіллес біжить у k разів швидше за черепаху (рис. 5, *б*). Доки Ахіллес пробіжить цей проміжок завдовжки a, черепаха встигне віддалитися від нього на відстань a/k. Коли Ахіллес пробіжить і цей проміжок a/k, черепаха віддалиться на відстань a/k^2, і так далі. Отже, Ахіллес ніколи не наздожене черепаху, бо між ними завжди буде певна дистанція. І якщо відомий парадокс Зенона накласти на теорію створення технічних систем (табл. 1), виникає наукова розбіжність, суперечність або неузгодженість, оскільки відповідно до варіантів 1 та 3 система ніколи не може бути створена. Хоча з погляду сучасної математики (математичного аналізу) цей парадокс розв'язується через поняття границі послідовності та суми нескінченно спадної геометричної прогресії. Тому науковців ще чекає ґрунтовне дослідження цієї суперечності, де завжди слід враховувати коефіцієнт затримки $к_з$ чи інерційність системи.

Підбиваючи підсумки цієї наукової роботи, слід зазначити, що існування та взаємодія штучних та природних систем відбувається за трьома концепціями їхнього розвитку, такими як еволюція, революція та трансформація (рис. 7), і кожна з них має свої переваги та недоліки.

а *б*

в

Рис. 7. Еволюція (а), революція (б) та трансформація (в)

Таблиця 1 – Створення технічних систем

Варіанти створення технічних систем				
	Назва варіанту	**Схема створення**	**Порядок дій**	**Алгоритм створення**
1	**Створення система, а потім елементної бази**	V_1 V_2 **V1>V2**	**S(x)є {a_{in}, b_{in}, c_{in}, d_{in}}**	
2	**Створення системи разом з елементною базою**	V_1 V_2 **V_1=V_2**	**{S(x), a_{in}, b_{in}, c_{in}, d_{in}}**	
3	**Створення елементної бази, а потім системи**	V_1 V_2 **V1<V2**	**{a_{in}, b_{in}, c_{in}, d_{in}} єS(x)**	
4	**Створення елементної бази, не у відповідності з функціоналом системи**	α_2 V_1 V_2 α_1 V_3	**{S_1(x), S_2(x), a_{in}, b_{in}, c_{in}, d_{in}}**	

Еволюція (від лат. Evolutio - розгортання) є загальним процесом поступового, незворотного розвитку та змін чогось у часі, що охоплює як кількісні, так і якісні варіації. У біології це процес природних трансформацій і спадкових ознак популяцій живих істот протягом історії Землі, що є причиною виникнення нових видів і пристосувань до умов довкілля. Головною перевагою є природний шлях, поступовий розвиток, коли є час для корегування напрямку та виправлення похибок, а природне пристосування до зовнішніх трансформацій є рушієм розвитку. Основний недолік – тривалий процес, адже в наш час

стрімких змін та накопичених критичних можливостей у різних сферах резерву часу на еволюцію майже не залишилося.

Революція систем означає кардинальну, стрімку зміну самої системи, на відміну від поступових еволюційних зрушень. Головна перевага – це радикальна, швидка зміна системи, а головний недолік – технологічні революції найчастіше спричиняють шкоду етиці, моралі, навколишньому середовищу та проходять у відриві від духовного зростання.

Трансформація систем є процесом глибоких змін, перетворення однієї системи на іншу, коли старі чинники та властивості зникають, а на їхньому місці з'являються нові. Така зміна є найскладніший, і водночас легкий шлях, тому що немає ворогів ззовні й відповідно, немає зовнішніх руйнувань (революційний шлях), а також не треба плентатись, і чекати коли корисні ознаки з’являтися у системі (еволюційний шлях). Складний тому, що потрібна сміливість, сила і воля знайти причину і сенси змін у собі.

Висновки. Таким чином, беручи до уваги вищезазначене, зрозуміло, що процес розвитку природних систем на планеті ознаменовується зростанням людського соціуму згідно з його потребами та викликами перед довкіллям. Відомо, що еволюція через природний відбір є випадковою, при цьому стаються мільйони мутацій, із яких корисними виявляються одиниці, і як наслідок, механізм еволюції за допомогою природного відбору доволі повільний – мають змінитись десятки поколінь, перш ніж корисна ознака закріпиться у популяції. Однак людству для виживання на планеті потрібне зменшення часу для появи корисної ознаки того чи іншого природного явища, і вирішенням таких завдань мають служити штучні системи. При цьому слід зазначити, що штучні системи визначаються як системи, що створюються і розвиваються безпосередньо людьми, або можуть бути будь-які зроблені людьми матеріальні продукти і технології, і якщо хоча б один елемент був цілеспрямовано змінений чи створений людиною, система вже може розглядатись як штучна. І якщо оточення сучасної людини розглядати з погляду викладеної методики, то людство мешкає у фактично ним сформованому штучному світі, і фундаментом сучасної теорії творення штучних систем є еволюційне моделювання за допомогою фахових комп'ютерних технологій.

Проте ще варто зауважити, що природні системи часто діють у значно більших масштабах і мають велику здатність до саморегуляції, тоді як штучні системи мають чітке проєктування та керуються певними правилами, що визначають їхню роботу.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті

Під час написання цього матеріалу автор використовував ChatGPT (інструмент штучного інтелекту від OpenAI) з метою логічного структурування окремих частин тексту та формулювання деяких речень у науковому стилі. Після використання цього інструменту автор переглянув та відредагував зміст за потреби і взяв на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. Bradford https://surl.li/hfpnvh.

2. Природні та штучні системи. (n.d.). *Home-Task*. https://school.home-task.com/prirodni-ta-shtuchni-sistemi.

3. Сорока, К. О. (2004). *Основи теорії систем і системного аналізу*. ХНАМГ.

4. Шрагіна, Л. І., & Меєрович, М. Й. (2023). *Штучні системи: Теорія створення та розвитку*. Бондаренко М. О.

5. Хом’як, І. В. (2022). *Екосистемологія*. Вид-во Житомирського державного університету імені Івана Франка.

6. Никифоров, В. В., Никифорова, О. О., & Сакун, О. А. (2011). Огляд сучасних класифікацій екосистем. *Екологічна безпека*, (1(11)), 44–49.

7. Порівняння природних і штучних екосистем. (n.d.). *MoyaOsvita*. https://moyaosvita.com.ua/ekologiya/%E2%9C%85porivnyanya-prirodnix-i-shtuchnix-ekosistem/.

8. Герасимчук, О. П. (2023). *Теорія технічних систем*. Луцький національний технічний університет.

9. Sakhno, E. Y. (2020). Theory of evolutionary interaction of natural and artificial systems. *East European Science Journal*, (10(62), Part 7), 51–56

References

1. Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. Bradford https://surl.li/hfpnvh.

1. Prirodni ta shtuchni sistemi [Natural and artificial systems]. Rezhym dostupu- Access mode: https://school.home-task.com/prirodni-ta-shtuchni-sistemi/.

2. Soroka K.O. (2024). Osnovi teoriyi sistem i sistemnogo analizu: Navch. Posibnik [Fundamentals of Systems Theory and Systems Analysis: Textbook]. Kharkiv: KhNAMG (in Ukrainain).

3. Shragina L.I., Meyerovich M.Y. (2023). Shtuchni sistemi: teoriya stvorennya ta rozvitku. Monografiya [Artificial systems: theory of creation and development. Monograph]. Odesa: Bondarenko M.O. (in Ukrainain).

4. Khomyak I.V. (2022). Ekosistemologiya: Navchalnij posibnik [Ecosystems: Textbook]. Zhytomyr: Publishing House of I. Franko Zhytomyr State University (in Ukrainain).

5. Nikiforov V.V., Nikiforova O.O., Sakun O.A. (2011). Oglyad suchasnih klasifikacij ekosistem [Overview of modern ecosystem classifications]. Ekologichna bezpeka- Environmental safety, no. 1/ (11), pp. 44-49 (in Ukrainain).

6. Porivnyannya prirodnih i shtuchnih ekosistem [Comparison of natural and artificial ecosystems]. Rezhym dostupu- Access mode: https://moyaosvita.com.ua/ekologiya/%E2%9C%85porivnyannya-prirodnix-i-shtuchnix-ekosistem/.

7. Gerasymchuk O.P. (2023). Teoriya tehnichnih sistem: Navchalnij posibnik dlya zdobuvachiv drugogo (magisterskogo) rivnya vishoyi osviti dennoyi ta zaochnoyi form navchannya [Theory of Technical Systems: A textbook for students of the second (master's) level of higher education in full-time and part-time forms of study]. Lutsk: NTU (in Ukrainain).

8. Sakhno E.Y. (2020). Teoriya evolyucijnoyi vzayemodiyi prirodnih i shtuchnih system [Theory of evolutionary interaction of natural and artificial systems]. Shidnoyevropejskij naukovij zhurnal- East European Scientific journal, No. 10(62), part 7, pp. 51-56 (in Poland).

Дата першого надходження статті до видання: 09.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 02.01.2026

UDC 004.03

Yevgeniy Sakhno

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: evsakhno@ukr.net. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-9789-7242. **SCOPUS ID:** 57190493489

CONCEPT OF INTERACTION BETWEEN NATURAL AND ARTIFICIAL SYSTEMS

The development of natural systems on the planet is characterized by the growth of human society's potential in line with its needs and the challenges facing the surrounding environment. At the same time, evolution through natural selection is random, and millions of mutations occur, of which only a few prove to be useful. As a result, the mechanism of evolution through natural selection is quite slow—dozens of generations must change before a useful trait becomes the established in the population. However, in order for humanity to survive on the planet, it is necessary to reduce the time it takes for a useful trait of a particular natural phenomenon to appear, and artificial systems should serve as a solution to such problems.

Artificial systems are defined as systems that are created and developed directly by humans, or can be any material products and technologies created by humans. At the same time, the basis of the modern theory of creating artificial systems is evolutionary modeling, which can be defined as the reproduction of the process of natural evolution using special system programs.

The scientific article presents research on the processes of interaction between natural and artificial systems and proposes a mechanism for their transformation that allows determining the nature of their combination and finding approaches to managing the process of creating and consolidating useful features and the environment in which they exist.

The exchange between energy potentials and the creation of an integrated, compatible system based on a model of interaction between natural and artificial systems are considered, and in turn, the compatible system is a link in their transition to a new, higher level of development. The main feature of the proposed model is the application of the theory of energy flows and the apparatus of differential equations that describe the stability of systems and changes in their parameters over time, and the solution of such equations is phase trajectories that determine the movement of systems in space.

Keywords: *natural systems; artificial systems; interaction; phase trajectories.*

Fig.: 7. Table: 1. References: 9.

Сахно Є. Ю. Концепція взаємодії природних та штучних систем. *Технічні науки та технології,* 2026. № 1(43). С. 22-33. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-22-33.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-34-46
UDC 621.791.18: 621.791.019: 537.525

Maksym Bolotov[1], Hennady Bolotov[2], Timur Hanieiev[3], Iryna Nahorna[4], Vladyslav Hrechka[5]

[1]PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Welding Technologies and Construction, Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: m.bolotov@stu.cn.ua. **ORCID**: https://orcid.org/0000-0002-0915-4132
Scopus Author ID: 57190377278. **Researcher ID:** H-4183-2014

[2]Doctor in Technical Sciences, Doctor, Doctor of Department of welding technologies and Construction Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: bolotovgp@ stu.cn.ua. **ORCID**: https://orcid.org/0000-0003-0305-2917
Researcher ID: H-5304-2014. **Scopus Author ID:** 6506157907

[3]PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Welding Technologies and Construction Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: t.ganeev@stu.cn.ua. **ORCID**: https://orcid.org/0009-0006-2041-1685
Scopus Author ID: 56938852000. **Researcher ID:** H-4183-2014

[4]Senior lecturer of Department of welding Technologies and Constructions, Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: irynanahorna@stu.cn.ua. **ORCID**: https://orcid.org/0000-0002-5075-8712
Scopus Author ID: 57192820279. **Researcher ID**: F-4705-2014

[5]Postgraduate student, Department of Welding Technologies and Construction Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: deadsilence166@gmail.com

TECHNOLOGICAL PARAMETERS AND QUALITY CONTROL WHILE DIFFUSION WELDING IN A GLOW DISCHARGE

The main parameters of diffusion welding and the features of their control methods are described. It is shown that, under conditions of diffusion welding with heating of parts in a glow discharge plasma, traditional methods of monitoring the temperature state of the welding zone such as thermocouples and optical pyrometers become insufficiently effective due to interferences caused by the specific characteristics of the glow discharge, namely, the presence of a strong electric field on the surface of the parts and plasma radiation. Under these conditions, it is more appropriate to use selective temperature control methods, particularly photoelectric pyrometers whose maximum spectral sensitivity lies in the infrared region of the electromagnetic spectrum emitted by the welded part. An effective and promising method for monitoring the thermal state of the welding zone for bodies of various shapes and dimensions is the use of deterministic mathematical models based on the fundamental laws of thermophysics.

***Keywords**: Diffusion welding; glow discharge; plasma; technological parameters; quality control.*
Fig.: 9. References: 24.

Urgency of the research. Diffusion welding process is widely and effectively used to obtain precision permanent joints for both homogeneous and heterogeneous materials. In diffusion welding, the joint formation occurs in the solid state and is determined by three main parameters that must be carefully controlled. These parameters include the heating temperature (T_h), the compression force (P), as well as welding time (t) [1].

The heating temperature of the welding zone should be $T_h = 0.6 – 0.8$ of the melting temperatures of the most fusible material in the welded assembly. Heating ensures both an increase in the rate of diffusion processes and the plasticity of materials in their contact zone.

The compression force (P) is intended to ensure a tight contact between the joined surfaces as a result of their limited plastic deformation. This also facilitates diffusion and recrystallization processes in the welding zone.

The welding process duration (t), under constant temperature and compression force, is mainly determined by the time required for the completion of diffusion processes in the contact zone of the joined materials and normally ranges from 10 up to 30 minutes [2; 3].

Target setting. The most important parameter of diffusion welding is the heating temperature in the contact zone of the joined materials. The main result of increasing the temperature of a solid body is an increase in the rate of atomic diffusion. This applies to both self-diffusion and impurity diffusion of alloying element atoms (hetero diffusion) [4]. The rate of physical

© M. Bolotov, H. Bolotov, T. Hanieiev, I. Nahorna, V. Hrechka, 2026

and chemical changes occurring through diffusion can be significantly increased by a relatively small temperature rise. For instance, the diffusion coefficient of indium atoms in a nickel substrate increases by two orders of magnitude (from 10^{-21} to 10^{-19} m²/s) when the substrate temperature rises about 100 K (from 798 up to 886 K) [5].

When the welding temperature decreases, not only the atomic diffusion processes are inhibited, the cleaning of the contacting material surfaces from oxides and contaminants by sublimation becomes difficult, and the deformation of surface roughness micro protrusions at the stage of forming the physical contact also does. Moreover, under such conditions, recrystallization processes which lead to the formation of common grains in the welding zone and are essential for obtaining a high-quality joint do not develop sufficiently [6].

At the same time, experimental data has shown that the dependence of diffusion weld strength on the welding temperature has an extreme character (see Fig. 1) [7] that is the maximum strength of the joint is achieved within a rather narrow temperature range. This is because an excessive increase in welding temperature, while accelerating diffusion processes, also causes grain growth during the welding of homogeneous metals or the formation of intermetallic compounds when welding dissimilar materials. The latter significantly deteriorates the mechanical properties of the joint has been weld. These factors make it necessary to carefully control the thermal mode of the joint zone while welding.

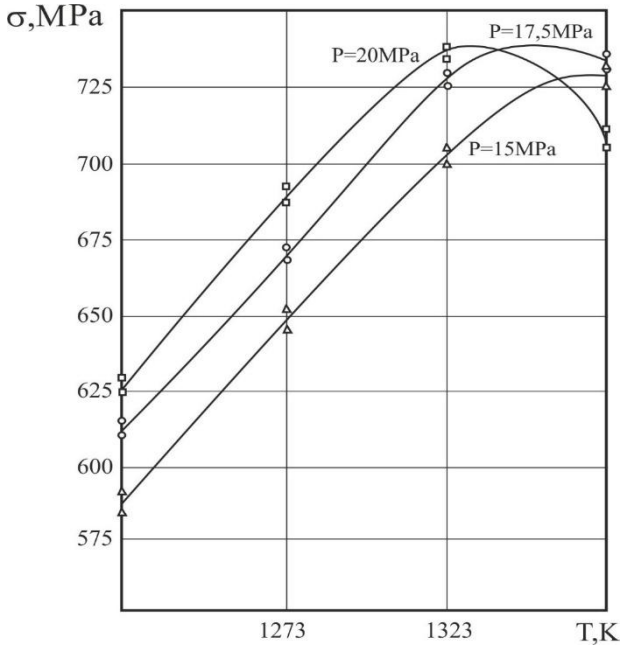


Fig. 1. Influence of Temperature and Compression Force on the Strength of the S66009 Steel Joint [7]

Actual scientific research and issues analysis. The temperature of diffusion welding must exceed the recrystallization temperature of the metals being joined and constitute a certain fraction of their melting temperature (the homologous temperature). The optimal heating temperature for each welded composition is generally determined experimentally. However, determining the optimal temperature also requires the use of appropriate temperature control methods and techniques.

Historically, the first and still traditional methods of heating workpieces during diffusion welding have been radiative and inductive (high frequency) heating [8; 9]. These methods are quite different in how heat is introduced into the materials being welded. The radiative heating source is surface based, while inductive heating is subsurface. However, temperature control

during diffusion welding is typically performed on the surface of the workpieces in the contact zone, primarily due to the design features of the welded components.

In the above-mentioned heating methods for diffusion welding, traditional temperature control techniques commonly used in many industries are also applied. These methods can be divided into contact and non-contact categories. In the first case, thermoelectric converters (thermocouples in particular K-type) are used, with the hot junction required to maintain reliable contact with the side surface of the metal in the welding zone by any suitable means. The accuracy of temperature measurement depends primarily on the reliability of this contact [10].

The distinctive feature of diffusion welding is the wide variety of welded components, both in shape and size. This diversity makes it impossible to establish uniform approaches to the issue of thermocouple attachment. Nevertheless, this control method is widely used in diffusion welding since thermocouples are highly sensitive, simple in design, and reliable in operation [11].

When the shape of the welded part does not allow for reliable contact with a thermocouple, non-contact temperature control methods using optical pyrometers are come into a play [12]. These devices respond to the monochromatic radiation produced by the thermal flux emitted by the heated body. The maximum sensitivity of optical pyrometers lies within the visible spectrum of electromagnetic waves from 0.4 up to 0.76 μm [13]. Monitoring of the workpieces` temperature is carried out through the viewing window of the vacuum chamber. Optical pyrometers with a reference tungsten filament that visually disappears when its brightness matches that of the heated surface (e.g., OPPIR-09, OPPIR-017) are used. The external view of OPPIR-017 is given in Fig. 2. Temperature measurement is carried out by visually comparing the brightness of the glowing filament with that of the heated surface, which introduces a certain subjectivity in measurement accuracy and limits the applicability of this method to temperature ranges where visible glow of the workpiece occurs (typically above 1073 K).

Fig. 2. The external view of optical pyrometer OPPIR-017

Uninvestigated aspects of the main problem. Recently, a new heating method in a glow discharge plasma has been actively developed and applied in diffusion welding. This technique offers significant technological and economic advantages over traditional methods [14; 15]. It is based on different physical principles rather than conventional methods and, accordingly, has its own limitations in the control of key technological parameters.

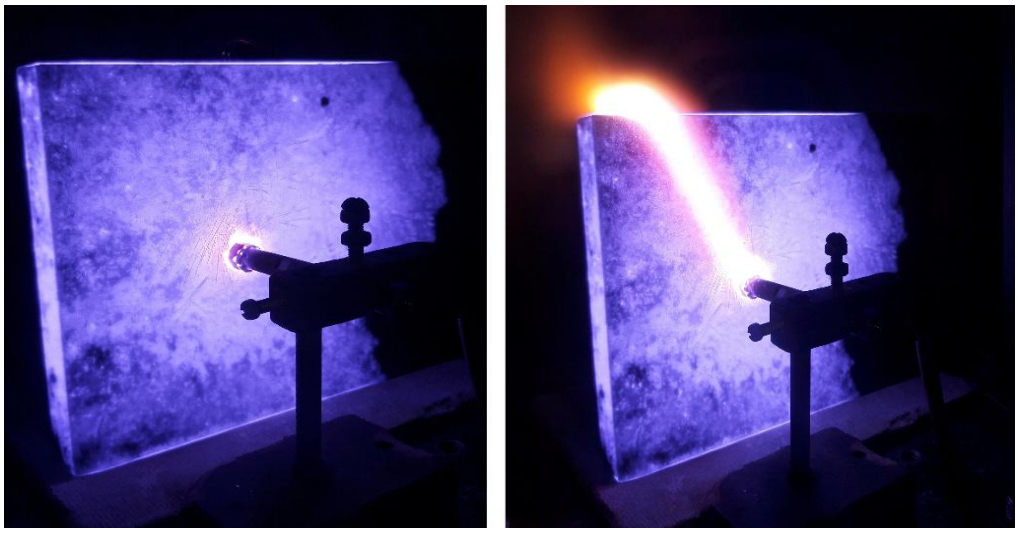
While long-term use of traditional diffusion welding methods has led to well-established approaches to process control and regulation, welding in a glow discharge lacks such practical experience and therefore requires of meticulous analysis.

The research objective. The purpose of current work is to analyze the physical properties of glow discharge under diffusion welding conditions and based on this analysis, to determine methods for controlling the technological parameters of the process and the features of their application.

The statement of basic materials. During diffusion welding, a glow discharge burns in a plasma-forming gaseous medium at a pressure of 1 – 10 kPa between two electrodes – an anode (rod or contour-type) and a cathode, which, in this case, acts as the welded workpiece itself [16]. The thermal energy is transferred from the glow discharge to the workpiece through the discharges` cathode spot, located on its lateral surface. Directly near the cathode (the workpiece) region the cathode fall of potential, which is covered above by a negative glow layer is placed. Beyond this layer follows the positive column of the plasma discharge [17].

A distinctive feature of the cathode fall region is the high intensity of the electric field reaching up to 10^5 V/m [18], which ensures the gas ionization necessary for the existence of the glow discharge.

Under these conditions, placing the hot (working) junction of a thermocouple on the surface of the workpiece distorts the shape of this surface, which in turn leads to distortion of the electric field in the near-cathode region of the discharge, accompanied by a local increase in field strength. Analysis of this factor, presented in [18], shows that under such conditions, the electric field intensity in the cathode fall region may reach up to10^9 V/m as gas pressure increases. At this field strength, auto-electronic emission can occur, resulting in a significant local increase in gas ionization and the formation of a high-conductivity channel where an electric arc develops (see Fig. 3).



a *b*

Fig. 3. Stable glow discharge on the surface of the workpiece (a); formation of an arc discharge at the location of a thermocouple attached to the surface (b)

The arc acts as a highly concentrated energy source capable of causing melting and destruction of the thermocouple. Therefore, the use of contact methods for monitoring the welded samples temperature during diffusion welding in a glow discharge is limited and can only be recommended at low gas pressures in the reactor, or in cases where the thermocouple can be placed in a location inaccessible to the discharge (e.g., inside cavities during external heating, and vice versa).

Certain difficulties also arise when using non-contact temperature measurement methods to determine the temperature in the contact zone of parts during welding in a glow discharge. The main problem is the possibility of optical interference due to illumination of the pyrometer

by the plasma radiation of the discharge. Plasma radiation occurs because of various types of interactions between charged particles. Several types of plasma radiation can be distinguished, each corresponding to a specific part of the electromagnetic spectrum [19].

Bremsstrahlung (braking radiation) (P_B) occurs when a free electron passing through the field of an atom or ion changes the direction or magnitude of its velocity, losing part of its kinetic energy in the form of electromagnetic radiation quanta. The power of braking radiation emission per unit volume of plasma can be defined as follows [19]:

$$P_B = 1.47 \cdot 10^{-26} n_e n_u z^2 \cdot (T_e)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

where n_e, n_i – concentration of electrons and ions in the plasma, cm^{-3}; Z – ordinal number of the element (gas) in the periodic table of elements; T_e – temperature of electrons (electron gas), K. The energy of electrons, and their temperature (electron energy E = 1 eV corresponds to an electron temperature T_e = 11600 K) accordingly, depends on the gas pressure (Fig. 4) and decreases with it goes up [20]. In practice, the energy of plasma electrons can vary within a wide range, therefore, bremsstrahlung may produce a continuous spectrum of electromagnetic waves. However, when the electron energy is below 1 eV, the main portion of the radiation energy lies within the visible and infrared regions of the spectrum.

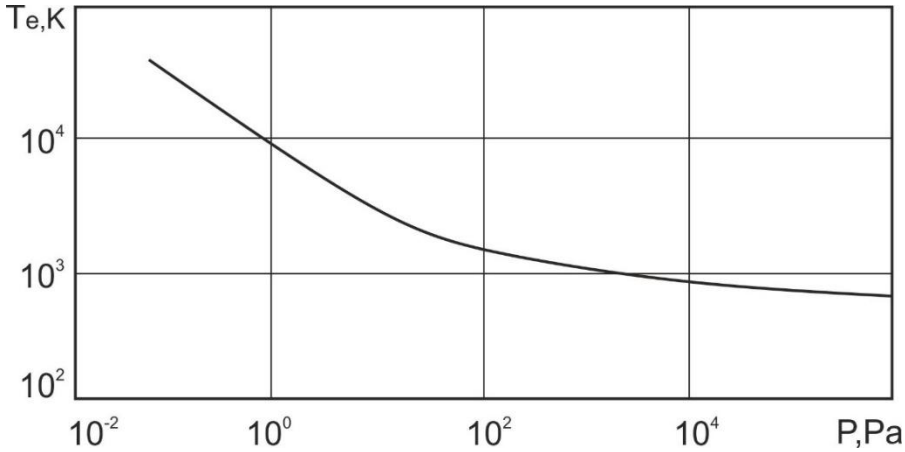


Fig. 4. Dependence of the electron temperature in glow discharge plasma on gas pressure

According to Fig. 4, this range of electron temperatures corresponds precisely to the welding conditions in a glow discharge, which occur within the pressure range of 10^3 – 10^4 Pa. However, from equation (1) it follows that as the electron energy decreases, the power of bremsstrahlung in the visible region of the spectrum also decreases accordingly.

The main process responsible for radiation emission (P_{re}) is volume recombination of ions. Recombination radiation arises when an electron is captured by a positive ion, releasing the energy previously spent on ionizing a neutral atom. The lower the electron energy, and the electron temperature T_e consequently, the more easily the electron can be captured, and the higher the power of this type of radiation [19]:

$$P_{re} = \frac{10^{-21} n_e^2}{(T_e)^{\frac{1}{2}}}, \quad (2)$$

As it was abovementioned, the energy of a free electron may take any value. Therefore, photons emitted during recombination can also form a continuous spectrum. However, the maximum power of recombination radiation is observed at gas pressures above 10^3 Pa when the electron energy drops down below 1 eV. Under these discharge conditions, radiation occurs primarily in the visible region of the spectrum and partially in the infrared.

In [20], it was determined that the total power of bremsstrahlung and recombination radiation at gas pressures of 10^3 – 10^4 Pa reaches 20-25% of the discharge power. Since in diffusion

welding processes the discharge power reaches 10 – 30 kW, the corresponding plasma radiation power mainly in the visible spectrum is also significant. This can create serious interference with the use of optical pyrometers based on visual observation for monitoring the thermal state of welded parts.

In some cases, temperature monitoring with optical pyrometers is carried out periodically, by temporarily turning off the glow discharge current during measurement. However, this approach significantly reduces heating efficiency and can only be applied to welded components with high thermal inertia.

Among other technical means of temperature control during diffusion welding in glow discharge plasma, the most effective has proven to be the use of photoelectric pyrometers (PEP). The external view of such a PEP is shown in Fig. 5.

Additionally, to the optical system, a PEP includes a sensitive element a photodiode operating in short-circuit mode, whose spectral sensitivity lies in the wavelength range above 0.7 μm, corresponding to infrared radiation.

Fig. 5. The external view of PEP Flus IR-862

Since the intensity of infrared radiation from glow discharge plasma under diffusion welding conditions is low, this method allows for high-accuracy temperature measurements. Moreover, PEP`s can measure temperature on the surface of a solid body at a point area of 1 mm² from a distance of up to 1 meter, enabling the monitoring of the exact contact zone of welded parts crucial for ensuring weld quality. The PEP`s are located outside the vacuum chamber, which makes them suitable for use in almost all welding setups (see Fig. 6).

The wide range of welded products in diffusion welding determines both a broad variety of materials and diverse geometries of welded assemblies. In some cases, the design of the welded joint may restrict or completely block visual access to the welding zone, making the use of optical temperature measurement methods in this zone impractical or impossible.

In such cases, it is advisable to use indirect temperature control methods by predicting the thermal state of the welding zone or any point within the welded assembly. Such real-time prediction can be performed through mathematical modeling of thermal processes, taking into account the thermophysical and geometrical properties of the materials being welded as well as the energy characteristics of the heating source namely, the glow discharge.

Fig. 6. Diffusion welding setup in a glow discharge equipped with a photoelectric pyrometer PEP-4 [rejuvenated by AI]

Under these conditions, the most effective approach is the use of deterministic dynamic models based on Fourier's heat conduction differential equations with appropriate initial and boundary conditions.

In [21], the main approaches to developing such models were formulated and examples of their practical implementation in glow discharge welding were presented. In particular, the prediction of the thermal state of the welding zone for parts of the simplest geometrical forms (cylinder) made of homogeneous or heterogeneous materials (see Fig. 7).

In [22], results for the development of thermal process models for welding bodies of more complex geometries with extended contact areas are presented. This makes it possible to predict the temperature distribution in the contact zone and adjust it by changing the glow discharge parameters.

The compressive force applied to the workpieces during diffusion welding ensures their plastic deformation in the contact zone, which facilitates the fracturing and fragmentation of the natural oxide films on the contacting surfaces [23]. The magnitude of the compression force should not exceed the yield strength of the more ductile material in the welded pair, in order to limit the degree of deformation. The design of compression systems, and therefore the methods for controlling compression force, do not depend on the energy source used for heating (induction, radiation, or glow discharge) and can thus be considered standardized.

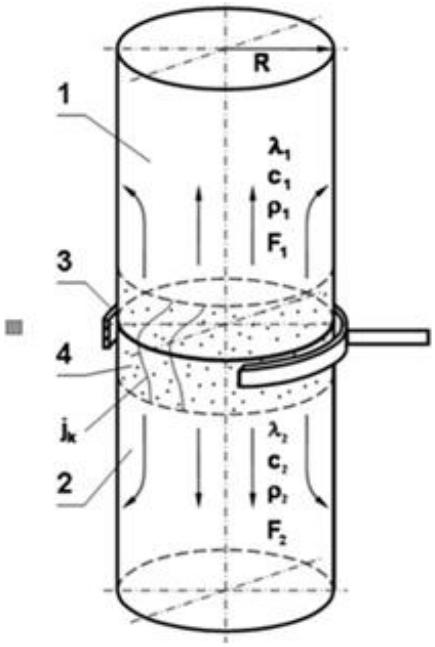


Fig. 7. Scheme of heating by glow discharge:
1, 2 – welded parts; 3 – electrode (anode); 4 – cathode spot of the discharge (heating zone);
j_c – distribution of current density in the cathode spot

An important parameter of diffusion welding is the exposure time of the workpieces under compression at a given temperature. This exposure time is necessary to allow diffusion processes across the contact zone to proceed sufficiently, leading to the formation of common grains, which indicates the elimination of the interface between the two materials and characterizes the quality of the welded joint. Usually, the duration of such isothermal holding is predetermined within a range of several tens of minutes or is determined experimentally.

At the same time, quality control of the joint during diffusion welding can be performed using technical means, particularly by measuring the electrical resistance of the contact zone. The resistance of this zone is higher than that of the base metal due to the presence of defects, such as incomplete bonding areas or oxide inclusions. The value of this resistance depends on the shape, size, and concentration of these defects. The principle of this control method can be based on the dependence between electrical resistance and joint strength as a function of welding time (see Fig. 8).

To minimize the influence of thermoelectromotive force generated in the high-temperature region between the workpiece and the probe contacts, the probes are made of the same material as the parts being joined. After reaching the preset heating temperature and applying the compressive force, a direct current is passed through the workpiece, and its value is monitored with an ammeter. The current strength depends on the size of the parts and the materials being welded, for steels it typically ranges from 1 to 10 A.

When the current passes through the parts and their contact zone, a potential difference arises between the probes, which can be measured using a potentiometer such as the R348 or a similar device. Alternatively, a four-probe micro-ohmmeter (e.g., type M246 or equivalent) may be used. Stabilization of the resistance value at a certain minimum level indicates the completion of strong joint formation.

To measure electrical resistance, it is advisable to use the four-point (Kelvin) method, which eliminates measurement errors caused by instability of the probe–workpiece contact (see Fig. 9).

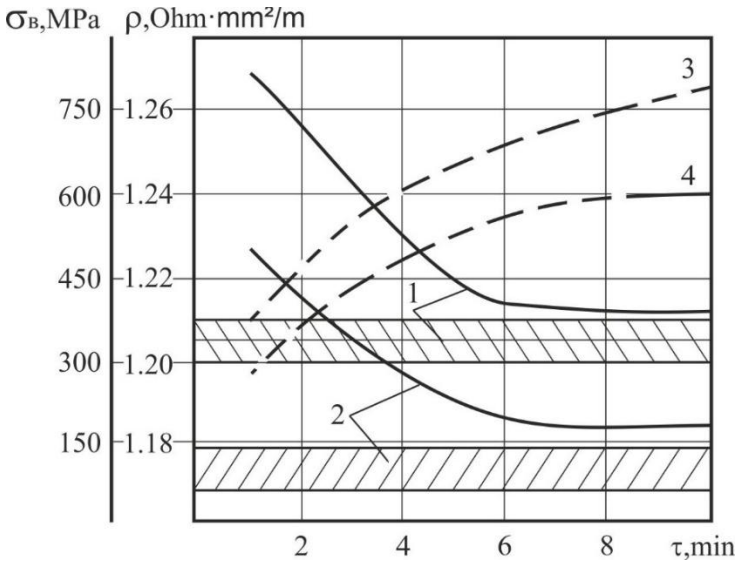


Fig. 8. Kinetics of electrical resistance decrease (1,2) and strength increase (3,4) during the welding of AISI 1045 (1,3) and S235JR (A36) (2, 4). Shaded areas represent the specific electrical resistance of the base metal at a welding temperature of 1273 – 1323 K [24]

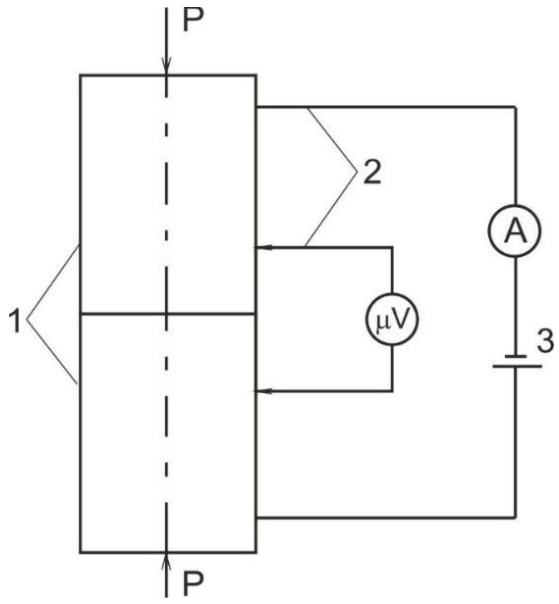


Fig. 9. The Scheme of electrical resistance measurement in the welding zone using the four-probe method:
1–welded parts; 2 – probes; 3 – DC power source

Conclusions. The main technological parameters of diffusion welding in vacuum and the corresponding control methods have been analyzed. It has been established that under glow discharge diffusion welding conditions, the application of traditional thermoelectric and optical methods for monitoring the thermal state of welded parts is limited due to the presence of a strong electric field and plasma radiation on their surfaces.

It was determined that a more effective method for monitoring the temperature in the welding zone under such conditions is the use of photoelectric pyrometers, whose spectral sensitivity corresponds to the infrared range of electromagnetic radiation emitted by the heated workpiece.

An efficient and promising approach for monitoring the temperature in the joint zone when welding parts of various shapes and sizes made from dissimilar materials is the use of computational prediction methods. These are based on deterministic mathematical models that allow real-time forecasting of the temperature evolution in the welding zone.

References

1. Bachyn, V. A., Kvasnytskyi, V. F., Kotelnikov, D. I., and others. (1991). *Theorie, technologie and equipment of the diffucion welding*. Higher school.

2. John, B., Letsch, H., Wölck, J., Hess, M., & Hensel, J. (2023). Process technology for diffusion welding with cyclically pulsative joining forces. *Metals*, *13*(3), 547. https://doi.org/10.3390/met13030547.

3. Shi, H., Qiao, S., Qiu, R., Zhang, X., & Yu, H. (2012). Effect of welding time on the joining phenomena of diffusion welded joint between aluminum alloy and stainless steel. *Materials and Manufacturing Processes*, *27*(12), 1366–1369. https://doi.org/10.1080/10426914.2012.663122.

4. Akca, E., & Gursel, A. (2017). The effect of diffusion welding parameters on the mechanical properties of titanium alloy and aluminum couples. *Metals*, *7*(1), 22. https://doi.org/10.3390/met7010022.

5. Neuhaus, P., Herzig, C., & Gust, W. (1989). Grain boundary diffusion of indium in nickel and nickel-indium. *Acta Metallurgica*, *37*(2), 587–595. https://doi.org/10.1016/0001-6160(89)90242-3.

6. Mittemeijer, E.J. (2010). Recovery, Recrystallization and Grain Growth. In: Fundamentals of Materials Science. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-10500-5_10

7. Kazakov, N. F. (Ed.). (1981). *Diffusion welding of materials: Handbook [Dyffuzyonnaia svarka materyalov: Spravochnyk]*. Mechanical engineering.

8. Gietzelt, T., Toth, V., & Huell, A. (2016). Diffusion bonding: Influence of process parameters and material microstructure. In *Joining technologies*. InTech. https://doi.org/10.5772/64312.

9. Asperheim, J. I., Das, P., Grande, B., Hömberg, D., & Petzold, T. (2024). Numerical simulation of high-frequency induction welding in longitudinal welded tubes. *Journal of Mathematics in Industry*, *14*(1). https://doi.org/10.1186/s13362-024-00147-8.

10. Nayak, L. J., & Roy, G. G. (2020). Thermocouple temperature measurement during high speed electron beam welding of SS 304. *Optik*, *201*, 163538. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163538.

11. Yasser Abdelaziz, Mahmoud Hammam, Faten Megahed & Ebtesam Qamar. (2022). Characterizing drift behavior in type K and N thermocouples after high temperature thermal exposures. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, *97*(1), 62–74. https://doi.org/10.37934/arfmts.97.1.6274.

12. Wippo, V., Devrient, M., Kern, M., Jaeschke, P., Frick, T., Stute, U., Schmidt, M., & Haferkamp, H. (2012). Evaluation of a pyrometric-based temperature measuring process for the laser transmission welding. *Physics Procedia*, *39*, 128–136. https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.10.022.

13. Pfefferkorn, F. E., Incropera, F. P., & Shin, Y. C. (2002). Surface Temperature Measurement of Semi-Transparent Ceramics by Long-Wavelength Pyrometry. *Heat Transfer*, 2. https://doi.org/10.1115/imece2002-39543.

14. Bolotov, M., Bolotov, G., Stepenko, S., & Ihnatenko, P. (2021). Impact of the samples' surface state on the glow discharge stability in the metals' treatment and welding processes. *Applied Sciences*, *11*(4), 1765. https://doi.org/10.3390/app11041765.

15. Bolotov, M. G., & Prybytko, I. O. (2021). Application of glow discharge plasma for cleaning (activation) and modification of metal surfaces while welding, brazing, and coating deposition. *Uspehi Fiziki Metallov*, *22*(1), 103–128. https://doi.org/10.15407/ufm.22.01.103.

16. Bolotov, M. (2018). Analiz osnovnykh nestabilnostei tliiuchoho rozriadu serednikh tyskiv v umovakh obrobky materialiv [Analysis of the main instabilities of a medium-pressure glow discharge under materials processing conditions]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical Sciences and Technologies*, (2(12)), 103–115. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-2(12)-103-115.

17. Bolotov, M. G., Bolotov, G. P., & Rudenko, M. M. (2024). The impact of nitriding parameters on evolution of properties of stainless-steel surface plasma-nitrided in glow discharge. *Progress in Physics of Metals*, *25*(1), 74–113. https://doi.org/10.15407/ufm.25.01.074.

18. Bolotov, G., Bolotov, M., & Korzachenko, M. (2021). Ion heating energy efficiency during diffusion welding in a normal DC glow discharge. In *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)* (pp. 1–4). IEEE. https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569988.

19. Hranovskyi, V. L. (1971). *Electircal current in gas: Established current. Science*.

20. Kahanov, I. L. (1972). *Ion devices*. Energy.

21.Bolotov, M., & Bolotov, G. (2020). Calculation of the glow discharge's stability boundary while welding. In *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)* (pp. 775–779). IEEE. https://doi.org/10.1109/ELNANO50318.2020.9088784.

22.Bolotov, G., & Bolotov, M. (2024). *The optimal type of glow discharge as a heating source for diffusion welding*. In 2024 IEEE 7th International Conference on Smart Technologies in Power Engineering and Electronics (STEE) (pp. TT3.48.1–TT3.48.4). IEEE. https://doi.org/10.1109/STEE63556.2024.10748058.

23.Reizer, Yu. P. (1987). *Physics of gas discharge*. Science.

24.Liu, D.-W., Lin, C.-N., Lin, W.-S., Lee, S., & Gwo, J. (2024). Influential factors on diffusion bonding strength as demonstrated by bonded multi-layered stainless steel 316L and 430 stack. *Materials, 17*(3713). https://doi.org/10.3390/ma17153713.

Список використаних джерел

1. Bachyn, V. A., Kvasnytskyi, V. F., Kotelnikov, D. I., and others. (1991). *Theorie, technologie and equipment of the diffucion welding*. Higher school.

2. John, B., Letsch, H., Wölck, J., Hess, M., & Hensel, J. (2023). Process technology for diffusion welding with cyclically pulsative joining forces. *Metals*, *13*(3), 547. https://doi.org/10.3390/met13030547.

3. Shi, H., Qiao, S., Qiu, R., Zhang, X., & Yu, H. (2012). Effect of welding time on the joining phenomena of diffusion welded joint between aluminum alloy and stainless steel. *Materials and Manufacturing Processes*, *27*(12), 1366–1369. https://doi.org/10.1080/10426914.2012.663122.

4. Akca, E., & Gursel, A. (2017). The effect of diffusion welding parameters on the mechanical properties of titanium alloy and aluminum couples. *Metals*, *7*(1), 22. https://doi.org/10.3390/met7010022.

5. Neuhaus, P., Herzig, C., & Gust, W. (1989). Grain boundary diffusion of indium in nickel and nickel-indium. *Acta Metallurgica*, *37*(2), 587–595. https://doi.org/10.1016/0001-6160(89)90242-3.

6. Mittemeijer, E.J. (2010). Recovery, Recrystallization and Grain Growth. In: Fundamentals of Materials Science. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-10500-5_10

7. Казаков, Н. Ф. (Ред.). (1981). *Диффузионная сварка материалов: Справочник*. Машиностроение.

8. Gietzelt, T., Toth, V., & Huell, A. (2016). Diffusion bonding: Influence of process parameters and material microstructure. In *Joining technologies*. InTech. https://doi.org/10.5772/64312

9. Asperheim, J. I., Das, P., Grande, B., Hömberg, D., & Petzold, T. (2024). Numerical simulation of high-frequency induction welding in longitudinal welded tubes. *Journal of Mathematics in Industry*, *14*(1). https://doi.org/10.1186/s13362-024-00147-8

10.Nayak, L. J., & Roy, G. G. (2020). Thermocouple temperature measurement during high speed electron beam welding of SS 304. *Optik*, *201*, 163538. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163538

11.Yasser Abdelaziz, Mahmoud Hammam, Faten Megahed & Ebtesam Qamar. (2022). Characterizing drift behavior in type K and N thermocouples after high temperature thermal exposures. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, *97*(1), 62–74. https://doi.org/10.37934/arfmts.97.1.6274

12.Wippo, V., Devrient, M., Kern, M., Jaeschke, P., Frick, T., Stute, U., Schmidt, M., & Haferkamp, H. (2012). Evaluation of a pyrometric-based temperature measuring process for the laser transmission welding. *Physics Procedia*, *39*, 128–136. https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.10.022

13.Pfefferkorn, F. E., Incropera, F. P., & Shin, Y. C. (2002). Surface Temperature Measurement of Semi-Transparent Ceramics by Long-Wavelength Pyrometry. *Heat Transfer*, Volume 2. https://doi.org/10.1115/imece2002-39543

14.Bolotov, M., Bolotov, G., Stepenko, S., & Ihnatenko, P. (2021). Impact of the samples' surface state on the glow discharge stability in the metals' treatment and welding processes. *Applied Sciences*, *11*(4), 1765. https://doi.org/10.3390/app11041765

15.Bolotov, M. G., & Prybytko, I. O. (2021). Application of glow discharge plasma for cleaning (activation) and modification of metal surfaces while welding, brazing, and coating deposition. *Uspehi Fiziki Metallov*, *22*(1), 103–128. https://doi.org/10.15407/ufm.22.01.103.

16.Болотов, М. (2018). Аналіз основних нестабільностей тліючого розряду середніх тисків в умовах обробки матеріалів. *Технічні науки та технології*, (2(12)), 103–115. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-2(12)-103-115.

17.Bolotov, M. G., Bolotov, G. P., & Rudenko, M. M. (2024). The impact of nitriding parameters on evolution of properties of stainless-steel surface plasma-nitrided in glow discharge. *Progress in Physics of Metals, 25*(1), 74–113. https://doi.org/10.15407/ufm.25.01.074.

18.Bolotov, G., Bolotov, M., & Korzachenko, M. (2021). Ion heating energy efficiency during diffusion welding in a normal DC glow discharge. In *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)* (pp. 1–4). IEEE. https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569988.

*19.*Hranovskyi, V. L. (1971). *Electircal current in gas: Established current. Science.*

20.Kahanov, I. L. (1972). *Ion devices*. Energy.

21.Bolotov, M., & Bolotov, G. (2020). Calculation of the glow discharge's stability boundary while welding. In *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)* (pp. 775–779). IEEE. https://doi.org/10.1109/ELNANO50318.2020.9088784.

22.Bolotov, G., & Bolotov, M. (2024). *The optimal type of glow discharge as a heating source for diffusion welding*. In 2024 IEEE 7th International Conference on Smart Technologies in Power Engineering and Electronics (STEE) (pp. TT3.48.1–TT3.48.4). IEEE. https://doi.org/10.1109/STEE63556.2024.10748058.

23.Reizer, Yu. P. (1987). *Physics of gas discharge*. Science.

24.Liu, D.-W., Lin, C.-N., Lin, W.-S., Lee, S., & Gwo, J. (2024). Influential factors on diffusion bonding strength as demonstrated by bonded multi-layered stainless steel 316L and 430 stack. *Materials, 17*(3713). https://doi.org/10.3390/ma17153713.

Дата першого надходження статті до видання: 19.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 06.01.2026

УДК 621.791.18: 621.791.019: 537.525

Максим Геннадійович Болотов[1], Геннадій Павлович Болотов[2], Тімур Рашитович Ганєєв[3], Ірина В'ячеславівна Нагорна[4], Владислав Володимирович Гречка[5]

[1]кандидат технічних наук, доцент, кафедри технологій зварювання та будівництва, Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: m.bolotov@stu.cn.ua. **ORCID**: https://orcid.org/0000-0002-0915-4132
Scopus Author ID: 57190377278. **Researcher ID:** H-4183-2014

[2]доктор технічних наук, професор, кафедри технологій зварювання та будівництва, Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: bolotovgp@ stu.cn.ua. **ORCID**: https://orcid.org/0000-0003-0305-2917
Researcher ID: H-5304-2014. **Scopus Author ID:** 6506157907

[3]кандидат технічних наук, доцент, кафедри технологій зварювання та будівництва, Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: t.ganeev@stu.cn.ua. **ORCID**: https://orcid.org/0009-0006-2041-1685
Scopus Author ID: 56938852000. **Researcher ID:** H-4183-2014

[4]старший викладач кафедри технологій зварювання та будівництва, Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: irynanahorna@stu.cn.ua. **ORCID**: https://orcid.org/0000-0002-5075-8712
Scopus Author ID: 57192820279. **Researcher ID**: F-4705-2014

[5]аспірант кафедри технологій зварювання та будівництва, Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: deadsilence166@gmail.com

КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ЯКОСТІ ДИФУЗІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ В ПЛАЗМІ ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ

Для отримання зварних з'єднань з однорідних та різнорідних матеріалів у виробах нової техніки широко застосовують дифузійне зварювання, яке здійснюється у твердому стані у вакуумі. Основними параметрами цього способу є температура нагріву зварюваних деталей, зусилля їх стискання та тривалість ізотермічної витримки або зварювання.

Дифузійне зварювання відноситься до низькосилових способів зварювання. Відносно невисокі температура та обмежене зусилля стискання дозволяють отримувати прецизійні зварні з'єднання, що не потребують подальшої механічної обробки. Головним параметром дифузійного зварювання є температура нагріву зони контакту з'єднуваних деталей. Експериментально визначено, що залежність міцності з'єднання від температури має екстремальний характер, тобто максимальна міцність досягається у вузькому діапазоні температур. Тому контролю температурного стану зони зварювання приділяється особлива увага.

У процесах дифузійного зварювання з індукційним та радіаційним нагрівом, що здійснюються у вакуумі, контроль температури здійснюється термопарами або оптичними пірометрами. Для процесів зварювання у плазмі тліючого розряду застосування цих методів обмежено. Це обумовлено, в першу чергу, наявністю світіння плазми на поверхні деталей. Аналіз фізичних особливостей розрядної плазми в умовах дифузійного зварювання при тисках газу 103…104 Па показує, що максимальна інтенсивність випромінювання плазми припадає на видиму область спектра електромагнітних хвиль, що не дозволяє застосовувати оптичні методи контролю. Найбільш ефективним методом у такому випадку є застосування фотоелектричних пірометрів, спектральна чутливість яких знаходиться у межах інфрачервоному випромінюванню зварюваних деталей.

При зварюванні деталей складної форми, коли візуальний контроль зони зварювання може бути обмеженим або недоступним, ефективним методом є прогнозування у реальному часі температурного стану зони з'єднання або будь-якої точки в об'ємі заготовок на основі математичних моделей процесу нагріву. Час зварювання визначає ступінь завершення дифузійних процесів, тобто момент зникнення зони розділу між деталями і, відповідно, якість зварювання. Зазвичай, оптимальний час зварювання знаходиться експериментально. Однак, необхідна тривалість ізотермічної витримки може бути визначена безпосередньо в процесі зварювання технічними засобами, зокрема неперервним вимірюванням електричного опору зони зварювання чотирьохзондовим методом (методом Кельвіна). Зниження опору в процесі зварювання та його стабілізація на мінімальному рівні свідчить про утворення міцного з'єднання.

Ключові слова: *дифузійне зварювання, тліючий розряд, плазма, технологічні параметри, контроль якості.*

Рис.: 7. Бібл.: 24.

Bolotov, M., Bolotov, H., Hanieiev, T., Nahorna, I., & Hrechka, V. (2026) Technological parameters and quality control while diffusion welding in a glow discharge. *Technical sciences and technologies*, (1(43)), 34-46. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-34-46.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-47-56
УДК 621.9.048

Павло Васильович Кондрашев[1], Олександр Миколайович Степура[2]

[1]кандидат технічних наук, доцент кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: kondrashev@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-7428-710X. **ResearcherID**: AAK-5011-2020

[2]старший викладач кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: oleksandrstepura@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-1915-9057. **ResearcherID**: M-6873-2018

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МАТЕМАТИЧНОЇ СТАТИСТИКИ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ КУБІЧНОГО НІТРИДУ БОРУ

Новітні методи та технології, а саме їх ефективна реалізація апріорі стає неможливою без застосування надтвердих матеріалів. Особливо це критично для інструментального виробництва в машинобудівній галузі. Тому застосування цієї групи матеріалів вимагає розробки нових та вдосконалення існуючих прогресивних методів обробки цих матеріалів. Вже упродовж 30 років одним із найпоширеніших в плані застосування, зокрема в машинобудівній галузі є кубічний нітрид бору або його модифікації (белбор, киборит та ін.). Саме тому вдосконалення та впровадження існуючих та нових інженерних рішень, спрямованих на підвищення ефективності реалізації методів обробки надтвердих матеріалів безумовно є актуальною задачею.

Метою цієї роботи є пошук шляхів підвищення ефективності реалізації процесу лазерного різання кубічного нітриду бору за допомогою методів математичної статистики, з подальшою оптимізацією технологічних факторів за рахунок застосування багатофакторної стратегії проведення експерименту.

У цій роботі було проведено дослідження процесу лазерного різання кубічного нітриду бору з застосуванням лазерного експериментального устаткування потужністю 200 Вт в імпульсному режимі генерації лазерного випромінювання. Енергія імпульсу складала 2 Дж, довжина імпульсу 200 мкс. Після лазерної обробки дослідні зразки розколювалися на спеціальному обладнанні. Для пошуку оптимальних режимів обробки, результати експерименту були оброблені із застосуванням методів математичної статистики.

***Ключові слова**: лазерне різання; надтверді матеріали; кубічний нітрид бору; математична статистика.*
Рис.: 5. Табл.: 2. Бібл.: 11.

Актуальність теми дослідження. В сучасному машинобудуванні стрімко зростає попит на застосування надтвердих матеріалів таких як кубічний нітрид бору. Це пов'язано насамперед з унікальними властивостями цих матеріалів, таких як висока твердість, термостійкість, теплопровідність, хімічна інертність [1]. Водночас наявність цих властивостей викликає певні складнощі в обробці, насамперед це стосується традиційних методів обробки. Зокрема, при механічній обробці надтвердих матеріалів в наслідок високої твердості, застосовується алмазний різальний інструмент, що значно скорочує його ресурс, а також підвищує витрати самого матеріалу в наслідок контактних явищ в зоні обробки. Уникнути цього, а також значно підвищити продуктивність процесу різання надтвердих матеріалів дає можливість застосування лазерної технології [2; 3], що значно розширює можливості для подальшої оптимізації процесу лазерного різання надтвердих матеріалів з застосуванням багатофакторної стратегії проведення експерименту. Зокрема побудова моделей та їх подальший аналіз дозволяє значно скоротити час на пошук оптимальних режимів процесу лазерного різання надтвердих матеріалів, з подальшим масштабуванням та впровадженням їх у виробничий процес.

Постановка проблеми. При обробці надтвердих матеріалів, таких як кубічний нітрид бору одна з головних проблем при механічній обробці, є підвищена витрата матеріалу зразка, а також інтенсивний знос алмазного різального інструменту, внаслідок контактних явищ в зоні обробки. Також слід відзначити той факт, що традиційні методи та підходи (зокрема механічна обробка алмазним інструментом), мають достатньо невелику продуктивність реалізації процесу, в наслідок низької швидкості механічного різання, через фізичні властивості цього матеріалу. КНБ має високу крихкість та схильність до утворення мікротріщин та сколів, навіть при незначних механічних ударах або

© П. В. Кондрашев, О. М. Степура, 2026

нерівномірному тиску. Також завжди є ризик передвчасного руйнування заготовки з КНБ в наслідок локального перегрівання під час тертя при механічній обробці. Також сучасна кон'юнктура ринку вимагає дедалі більш складну геометричну конфігурацію виробів з кубічного нітриду бору, що не можна реалізувати використовуючи традиційні технологічні процеси.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні наукові дослідження в цьому напрямку показують низку різноманітних наукових підходів та цікавих інженерних рішень, які спрямовані на підвищення ефективності реалізації процесу лазерного різання надтвердих матеріалів як в цілому, так і конкретно кубічного нітриду бору. Зокрема в роботі [4] науковці досліджують механізм руйнування дослідного зразка з КНБ (кубічний нітрид бору) за допомогою гібридної технології, поєднуючи лазерну різку CO_2 лазера та енергію водяного струменя. Причому руйнування та деформація зразка відбувається за рахунок термічних напружень, які виникають після опромінення заготовки лазерним променем та подальшою обробкою струменем води. Недоліком цього методу є хімічні фазові перетворення заготовки, тобто перехід кубічного нітриду бору до гексагонального нітриду бору. Вказаний недолік значно мінімізується на прикладі реалізації технології лазерного різання нанотрубок з КНБ [5], дослідники проводять лазерне різання КНБ трубок безпосередньо в середовищі води, що значно мінімізує поліморфні перетворення структури КНБ, внаслідок відсутності високих градієнтів температур. Цікаве дослідження лазерного різання КНБ показано в роботі [6], де використовували лазерний технологічний комплекс на базі твердотільного лазера з довжиною хвилі 1,06 мкм. Технологічний процес реалізується виключно за допомогою лазерного різання на певну глибину, після витримки опроміненням відбувається руйнування дослідного зразка, недоліком цього підходу є, в першу чергу складність контролювання процесу руйнації, яка може протікати в будь-якому напрямку.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Опираючись на ґрунтовний аналіз літературних джерел [1-6] можна відмітити наступні недосліджені області в даному науковому напрямку, а саме недостатньо досліджена сфера застосування гібридних підходів та технологій з використанням додаткових джерел, енергії при реалізації даного технологічного процесу. Аналізуючи наукові дослідження стає зрозумілим той факт, що досягти якісних та ефективних результатів при реалізації процесу лазерного різання КНБ, без модифікації внутрішньої мікроструктури й відповідно подальшим зміненням комплексу фізико-механічних властивостей матеріалу зразка, застосовуючи лише лазерну технологію стає достатньо складним завданням. У наукових роботах, які досліджували гібридні інженерні рішення та підходи не було враховано та досліджено вплив додаткового джерела енергії на структуру КНБ зразка. Тому в цій роботі акцент наукових досліджень був спрямований саме на гібридному підході реалізації технології лазерного різання КНБ зразків, а також було досліджено вплив додаткового джерела енергії у вигляді керованого механічного впливу на ефективність та продуктивність реалізації даного технологічного процесу.

Метою статті є пошук шляхів підвищення ефективності реалізації процесу лазерного різання кубічного нітриду бору за допомогою методів математичної статистики з подальшою оптимізацією технологічних факторів за рахунок застосування багатофакторної стратегії проведення експерименту.

Методика проведення досліджень. При лазерному різанні надтвердих матеріалів (природні або синтетичні алмази, різноманітні тверді сплави) переважно застосовуються дві схеми реалізації технологічного процесу, а саме: без заглиблення, та з заглибленням

фокальної площини оптичної системи в тіло зразка. В останньому випадку можливе програмне збільшення ширини різу. У цій роботі було застосовано 2-гу схему, тобто з заглибленням фокальної площини. На підставі аналізу апріорної інформації [1-6] були визначені технологічні фактори з відповідними рівнями варіювання (X_i) в натуральному та кодованому масштабі (табл. 1). Також було встановлено статистичну значущість цих технологічних факторів та їх нелінійний вплив на результат та якість обробки. У такому випадку для адекватного опрацювання результатів експерименту було обрано симетричний композиційний рототабельний план, якій має достатньо високі статистичні характеристики (дозволяє побудувати точну квадратичну модель і врахувати кривизну та взаємодію технологічних факторів, що описують процес лазерного різання) [7-9] (загальна кількість дослідів N=30), причому як функції відгуків були використані ширина різу (W), середня глибина різу (*Depth_1*), глибина перфорації (*Depth_2*) та шорсткість поверхні різу (R_Z). Для математичної інтерпретації симетричного композиційного рототабельного плану було використано поліном 2-го порядку (1):

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{i=k} b_i x_i + \sum_{i<j=1}^{i=k} b_{ij}\, x_i\, x_j + \sum_{ii=1}^{i=k} b_{ii} x_{ii}^2, \quad (1)$$

де k - кількість технологічних факторів;

b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} - коефіцієнти рівняння регресії;

i, j - індекси.

Попереднє дослідження технологічного процесу лазерного різання кубічного нітриду бору дозволило встановити границі технологічних факторів, які відповідно дозволяють гарантувати фізичну реалізацію процесу скрайбування зразка на глибину 0,5 мм. Також слід відзначити, що інтервали варіювання перевищили їх середньоквадратичну помилку. У кожній експериментальній точці досліди було продубльовано три рази (n_u = 3). Проведення експериментів, розрахунки коефіцієнтів рівняння регресії, перетворення систем координат відповідають загальній методиці проведення досліджень [7-9].

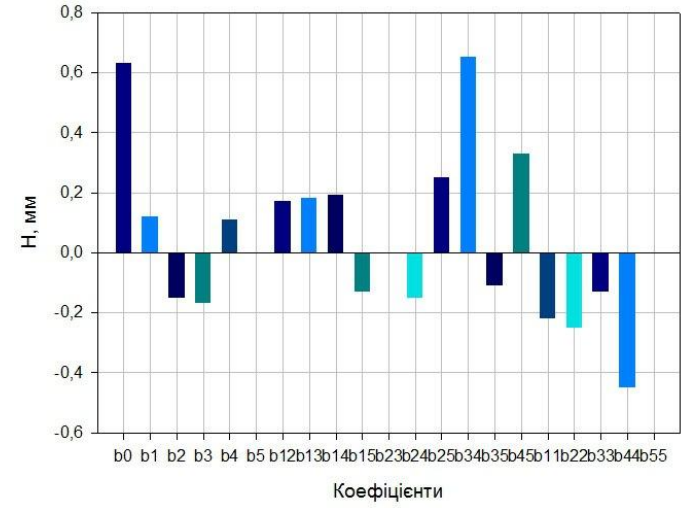
Таблиця 1 – Рівні варіювання технологічних факторів

Технологічні фактори	X1	X2	X3	X4	X5
	Швидкість (V), мм/с	Кількість проходів (n), раз	Частота (f), Гц	Розфокусування (ΔF), мм	Тиск (P), Атм
Основний рівень (X_i=0)	600	8	15	0	1,2
Інтервал варіювання (DX_i)	150	2	5	0,1	0,4
Верхній рівень (X_i=+1)	750	10	20	0,1	1,6
Нижній рівень (X_i=-1)	450	6	10	-0,1	0,8
Зіркове плече (X_i=+2)	900	12	25	0,2	2
Зіркове плече (X_i=-2)	300	4	5	-0,2	0,4

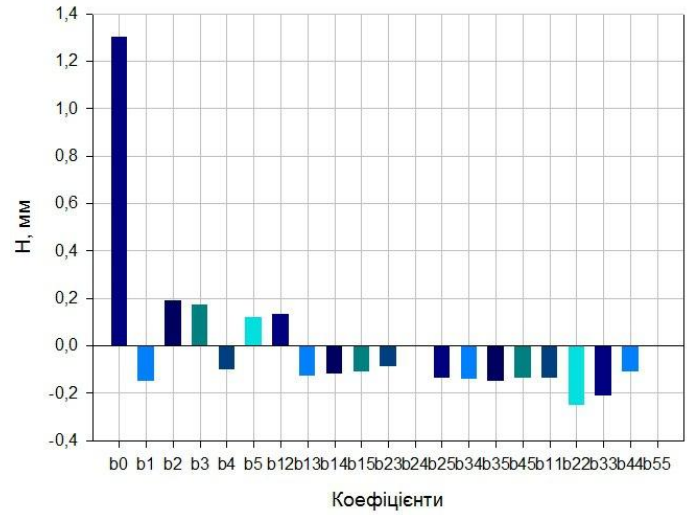
Аналізуючи результати розрахунків, можна відмітити, що для моделей процесу, які описують залежності ширини та глибини різу відповідно до технологічних факторів висунуті статистичні гіпотези про адекватність підтвердились:

- дисперсії дослідів однорідні;

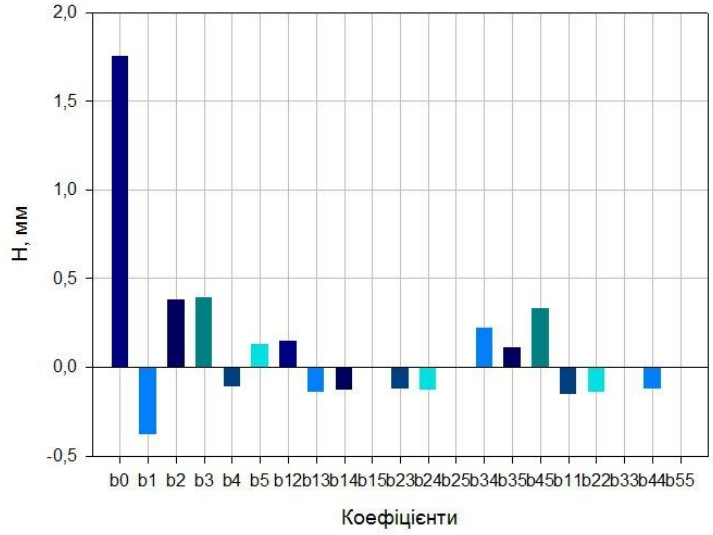
- рівняння регресії адекватні, на рис. 1 наведені коефіцієнти рівнянь регресії, які описують процес лазерного різання кубічного нітриду бору у вигляді рангових діаграм.



а



б



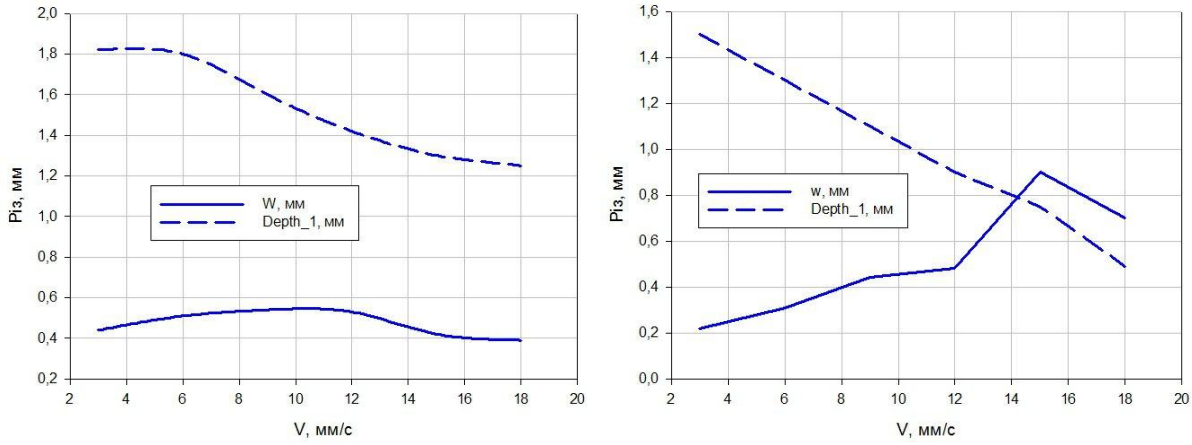
в

Рис. 1. Рангові діаграми коефіцієнтів рівняння регресії, які описують процес лазерного різання кубічного нітриду бору: а – ширина різу; б – глибина різу; в – глибина перфорації

Також слід відзначити що функція відгуку, яка описує шорсткість стінок різу від значень технологічних факторів не підтвердила гіпотезу стосовно адекватності (розрахунковий критерій Фішера перевищує табличний [7-9]). Тому в подальших дослідженнях дана залежність не враховувалась.

Результати проведених досліджень. На підставі проведених експериментальних досліджень, слід відзначити наступне, а саме отримані математичні моделі процесу лазерного різання кубічного нітриду бору, які описуються поліномом другого порядку (1) по своєї суті являють собою так звані "чорні ящики", і відповідно до обраної стратегії планування проведення експерименту, не розкривають достатньою мірою фізичної сутності процесів, які відбуваються в матеріалі, що оброблюється, це в свою чергу ускладнює аналіз та інтерпретацію результатів експериментальних досліджень. Водночас вони дозволяють адекватно оцінити величину впливу кожного технологічного фактору на функцію відгуку в просторі проєктування. Тому аналізуючи абсолютні значення коефіцієнтів рівняння регресії, слід зазначити, що на глибину різу та глибину перфорації суттєвий вплив має саме лінійна складова технологічних факторів.

Також було встановлено, що при зменшенні густини енергії сфокусованого лазерного променя з урахуванням збільшення швидкості обробки спостерігається зменшення глибини та відповідно ширини різу (рис. 2, *а, б*).



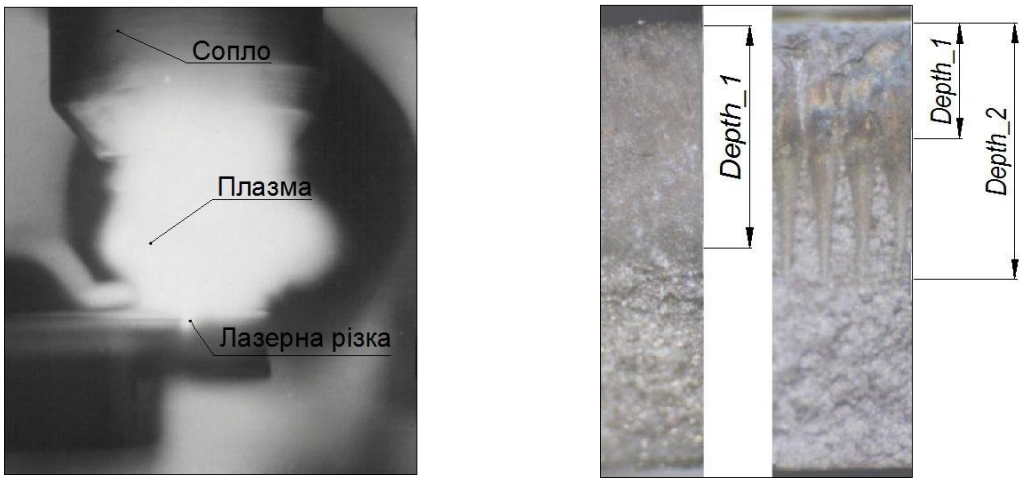
а) б)

Рис. 2. Залежності глибини depth_1 та ширини W лазерного різу КНБ від швидкості обробки, кількість проходів n=8, частота слідування імпульсів f=15 Гц при різних значеннях тиску робочого газу:
а)-Р=0,4 Атм.; б)-Р=2 Атм.

Однак водночас слід зауважити, що при тиску робочого газу 0,4 Атм та швидкості обробки 12 мм/с (рис. 2, *а*) спостерігається незначне збільшення ширини різу, теж саме явище спостерігається при швидкості 15 мм/с і відповідно тиску робочого газу 2 Атм (рис. 2, *б*), що пояснюється перефокусуванням лазерного випромінювання в області плазмової хмари (рис. 3, *а*), що призводить до збільшення плями фокусування і як наслідок ширина різу збільшується. Що стосується впливу інших технологічних факторів на процес лазерного різання кубічного нітриду бору, було встановлено, що при збільшенні кількості проходів та відповідно частоти імпульсів лазерної генерації обидва вихідних параметри глибина та ширина різу збільшуються.

Також слід відзначити, що при відсутності синхронізації між переміщенням деталі та частоти подачі лазерних імпульсів можлива ситуація багаторазового потрапляння сфокусованого випромінювання в однакові точки, що створює передумови для формування масиву "елементарних" отворів. Про що свідчить зовнішній вигляд поверхні лазерного різу (рис. 3, *б*), якій показує це явище.

Цікавим є той факт, що при збільшенні кількості подвійних проходів також спостерігається збільшення глибини та ширини лазерного різу. На рис. 4 наведені залежності ширини та глибини лазерного різу кубічного нітриду бору від кількості проходів, у випадку, коли швидкість обробки V=16 мм/с, частота слідування лазерних імпульсів f = 25 Гц, тиск робочого газу P = 2 Атм.



а *б*

Рис. 3. Лазерне різання кубічного нітриду бору (а), та зовнішній вигляд поверхні лазерного різу (б)

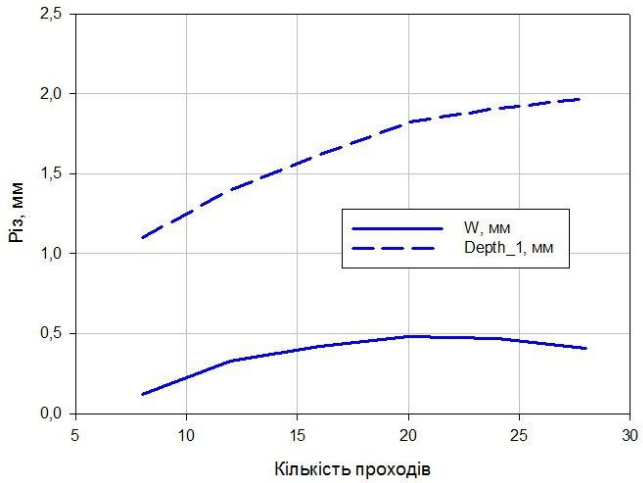


Рис. 4. Залежності глибини та ширини лазерного різу від кількості проходів сфокусованого лазерного випромінювання (V=16 мм/с, f=25 Гц, P=2 Атм)

Отже, така інтерпретація отриманих залежностей дозволяє стверджувати, що їх можна використовувати зокрема й для попередньої оцінки клиноподібності лазерного різу. Однак слід взяти до уваги той факт, що при збільшенні сумарної дисперсії, адекватність отриманої залежності стає надзвичайно низькою. Дослідження процесу лазерного різання КНБ за допомогою залежностей (1) з урахуванням статистичної значущості кожного технологічного фактора (рис. 1) можна проводити достатньо довго з урахуванням фізичної складності процесу. Саме тому для пошуку оптимальних режимів обробки, які надалі можна було б легко масштабувати та впроваджувати в подібних технологічних процесах на виробництві, були використані методи нелінійного програмування [10]. Причому пошук режимів обробки було проведено з урахуванням забезпечення максимальної глибини різу (4 мм) (2) зі збільшенням факторної області (3) та шириною різу, яка лежить у границях від 0,4-0,9 мм (4).

$$Depth_1(x_i) = 4, \quad (2)$$

$$x_{imin} \le x_i \le x_{imax}, x_2 \le +4, \quad (3)$$

$$0{,}4 \le W(x_i) \le 0{,}9, \quad (4)$$

де x_{imin}, x_{imax}-границі змінення незалежних змінних (табл. 1).

Залежності (1-4) були оптимізовані за допомогою «штрафних» функцій [7] в одне рівняння (5).

$$\Phi(x, R) = f(x) + R\sum_{j=1}^{m} P_j(x), \quad (5)$$

де *f(x)*-цільова функція для модифікації;

R-параметр штрафу;

P-квадрат порушення.

При реалізації "штрафних" функцій для лазерного різання КНБ до цільової функції (математична модель, яка описує процес лазерного різання КНБ) по черзі додавалися штрафні функції в разі відхилення від гранично допустимих значень (визначалися експериментально на технологічних пробах) параметрів керування процесом лазерного різання КНБ, для яких відповідно проводилася оптимізація, в нашому випадку це швидкість *V*, кількість проходів *n*, частота слідування імпульсів *f*, тиск робочого газу *P*. Накладання штрафів дає можливість уникнути режимів обробки при яких виникає псування матеріалу (тріщини, перегрів, поліморфні перетворення). В даній роботі для оптимізації параметрів керування процесом лазерного різання КНБ накладалися штрафи не наступні технологічні параметри керування процесом лазерного різання КНБ:

- штраф за «конусність»: КНБ дуже твердий, тому лазерний промінь розсіюється. Якщо швидкість перевищувала значення (*V*>20 мм/с, рис. 2), нижня частина різу не прогрівалася, відповідно функція відгуку різко зростала, сигналізуючи про брак.

- термічний штраф: КНБ чутливий до термічного удару. Якщо тривалість імпульсу була більше (*f*>25 Гц) та кількість проходів (*n*>15), вводився штраф за розширення зони термічного впливу ЗТВ (рис. 5).

- штраф за механічні ушкодження (мікротріщини, сколи) при значеннях тиску робочого газу (*P*>2 Атм) відбувалося значне механічне навантаження на зону різу. Оскільки КНБ чутливий до термічних ударів, поєднання високої температури технологічного лазера та інтенсивного охолодження потоком робочого газу пояснює утворення термічних напружень та розтріскування країв зразка.

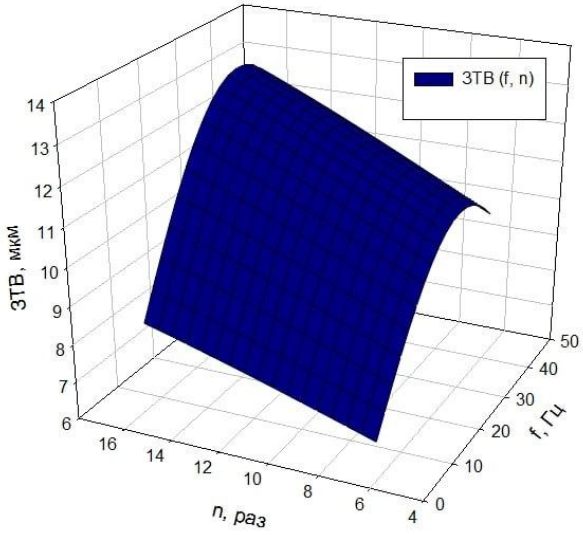


Рис. 5. Залежність величини зони термічного впливу ЗТВ, мкм від частоти слідування імпульсів лазерного випромінювання f, Гц та кількості проходів n

Також було встановлено, що лазерне різання КНБ завтовшки 4 мм доцільно проводити на таких режимах обробки, а саме швидкість обробки V = 20 мм/с, кількість проходів n = 10, частота слідування імпульсів f = 20 Гц, розфокусування ΔF = 0,4 мм, тиск робочого газу P = 2 Атм. При таких режимах обробки ширина різу на вході становить 0,7 мм, шорсткість поверхні складає 20 мкм. Продуктивність процесу різання КНБ з застосуванням розробленої методики була оцінена співвідношенням глибини лазерного різання h_1 до глибини механічного різання h_2 за один прохід. Причому середня швидкість процесу лазерного різання становила 15 мм/с, що відповідає середній швидкості різання алмазним інструментом 900 м/хв [11] при механічному різанні (табл. 2).

Таблиця 2 – Показники продуктивності процесу лазерного різання КНБ із застосуванням розробленої методики в порівнянні з традиційними технологіями

Товщина заготовки, мм	Середня швидкість різання, мм/с	Глибина лазерного різання за один прохід h_1, мм	Глибина механічного різання за один прохід h_2, мм	Продуктивність процесу, раз
4	15	0,4	0,02	20

Висновки. На підставі проведених теоретичних та експериментальних досліджень було встановлено:

- отримані математичні моделі, які описують процес лазерного різання кубічного нітриду бору товщиною 4 мм;
- для досліджуваного сумарного факторного простору було встановлено максимальний вплив на процес лазерного різання кубічного нітриду бору густини енергії, швидкості процесу, кількості проходів та частоти слідування імпульсів;
- доведено, що при відсутності синхронізації між швидкістю переміщення деталі та частотою слідування імпульсів можливе виникнення повторного потрапляння сфокусованого лазерного випромінювання в однакові точки;
- встановлені оптимальні режими процесу лазерного різання кубічного нітриду бору, швидкість обробки V = 20 мм/с, кількість проходів n = 10, частота слідування імпульсів f = 20 Гц, розфокусування ΔF = 0,4 мм, тиск робочого газу P = 2 Атм, які дозволяють підвищити продуктивність процесу в порівнянні з традиційними методами обробки у 20 разів.

Список використаних джерел

1. Волкогон, В. М., & Антонюк, Н. В. (2002). Вплив та перспективи створення та застосування ріжучого інструменту з гексаніту. *Світ техніки та технології, 11,* 42–44.

2. Коваленко, В. С., & Лавринович, А. В. (1991). *Лазерна обробка керамічних матеріалів*. Техніка.

3. Коваленко, В. С., Анякін, М. І., та ін. (2002). Лазерне різання. *Electrical Machining, 7,* 9–14.

4. Wu, Z., & Ammar, A. (2015). Hybrid CO_2 laser/waterjet (CO_2-LWJ) cutting of polycrystalline cubic boron nitride (PCBN) blanks with phase transformation induced fracture. *Optics & Laser Technology, 70,* 39–44.

5. Bhandari, S., Tiwari, B., Yapici, N., Zhang, D., & Yap, Y. K. (2016). Introduction to boron nitride nanotubes: Synthesis, properties, functionalization, and cutting. In *Boron nitride nanotubes in nanomedicine* (pp. 1–15).

6. Bloshchanevich, A. M. (2004). Laser cutting of diamond-based materials and dense modifications of boron nitride. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 43,* 150–155.

7. Новік, Ф. С., & Арсов, Я. В. (1980). *Оптимізація технології обробки металів експериментально розробленими методами*. Наука.

8. Коваленко, В. С., Анякін, М. І., та ін. (2000, November). Моделювання та оптимізація процесів лазерного різання (напівпровідникові лазери). In *Proceedings of the International Congress "ICALEO 2000"* (pp. D82–D92).

9. Коваленко, В. С., Котляров, В. П., Дятел, В. П., та ін. (1985). *Довідник по технології лазерної обробки*. Техніка.

10. Хіммелблау, Д. (1975). *Застосування нелінійного програмування*. Світ.

11. Бакуль, В. М. та ін. (б. р.). *Алмазна обробка надтвердих матеріалів*. Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля.

References

1. Volkohoh, V. M., & Antoniuk, N. V. (2002). Vplyv ta perspektyvy stvorennia ta zastosuvannia riuzhuchoho instrumentu z heksanitu [Impact and prospects of creation and application of cutting tools made of hexanite]. *Svit tekhniky ta tekhnolohii – World of Technics and Technologies*, (11), 42–44.

2. Kovalenko, V. S., & Lavrynovych, A. V. (1991). *Lazerna obrobka keramichnykh materialiv [Laser processing of ceramic materials]*. Tekhnika.

3. Kovalenko, V. S., Aniakin, M. I., et al. (2002). Lazerne rizannia [Laser cutting]. *Electrical Machining*, (7), 9–14.

4. Wu, Z., & Ammar, A. (2015). Hybrid CO_2 laser/waterjet (CO_2-LWJ) cutting of polycrystalline cubic boron nitride (PCBN) blanks with phase transformation induced fracture. *Optics & Laser Technology*, *70*, 39–44.

5. Bhandari, S., Tiwari, B., Yapici, N., Zhang, D., & Yap, Y. K. (2016). Introduction to boron nitride nanotubes: Synthesis, properties, functionalization, and cutting. In *Boron nitride nanotubes in nanomedicine* (pp. 1–15). William Andrew Publishing.

6. Bloshchanevich, A. M. (2004). Laser cutting of diamond-based materials and dense modifications of boron nitride. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, *43*, 150–155.

7. Novik, F. S., & Arsov, Ya. V. (1980). *Optymizatsiia tekhnolohii obrobky metaliv eksperymentalno rozroblenymy metodamy [Optimization of metal processing technology by experimentally developed methods]*. Nauka.

8. Kovalenko, V. S., Aniakin, M. I., et al. (2000, November). *Modeliuvannia ta optymizatsiia protsesiv lazernoho rizannia (napivprovidnykovi lazery)* [Modeling and optimization of laser cutting processes (semiconductor lasers)]. In *Proceedings of the International Congress "ICALEO 2000"* (pp. D82–D92). Laser Institute of America.

9. Kovalenko, V. S., Kotliarov, V. P., Diatel, V. P., et al. (1985). *Dovidnyk po tekhnolohii lazernoi obrobky* [Handbook on laser processing technology]. Tekhnika.

10.Himmelblau, D. (1975). *Zastosuvannia neliniinoho prohramuvannia [Applied nonlinear programming].* Svit.

11.Bakul, V. M., et al. (n.d.). *Almazna obrobka nadtverdykh materialiv* [Diamond processing of superhard materials]. Instytut nadtverdykh materialiv im. V. M. Bakulia [V. Bakul Institute for Superhard Materials].

Дата першого надходження статті до видання: 19.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.01.2026

UDC 621.9.048

Pavlo Kondrashev[1], Oleksandr Stepura[2]

[1]PhD, Assistant Professor of the department Laser System and Advanced Technologies
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)
E-mail: kondrashev@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-7428-710X. **ResearcherID**: AAK-5011-2020

[2]Senior lecturer of the department Laser System and Advanced Technologies
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)
E-mail: oleksandrstepura@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-1915-9057. **ResearcherID**: M-6873-2018

APPLICATION OF METHODS OF MATHEMATICAL STATISTICS IN THE IMPLEMENTATION OF THE LASER CUTTING PROCESS OF CUBIC BORON NITRIDE

The latest methods and technologies, namely their effective implementation a priori becomes impossible without the use of superhard materials. This is especially critical for tool production in the machine-building industry. Therefore, the use of this group of materials requires the development of new and improvement of existing progressive methods for processing these materials. For 30 years, one of the most widespread in terms of application, in particular in the machine-building industry, is cubic boron nitride or its modifications (belbor, cyborite, etc.). That is why the improvement and implementation of existing and new engineering solutions aimed at increasing the efficiency of the implementation of methods for processing superhard materials is definitely an urgent task.

Analysis of literary sources in this scientific topic allowed us to identify unexplored parts of the global problem, in particular, when processing superhard materials, such as cubic boron nitride, one of the main problems, with traditional processing methods, for example mechanical, is the increased consumption of sample material, as well as intensive wear of the diamond cutting tool, as a result of contact phenomena in the processing zone. It should also be noted that traditional methods and approaches have a rather low productivity of the process implementation. The use of laser technology, in particular laser cutting, makes it possible to significantly increase the productivity of the cutting process, primarily due to the absence of contact phenomena in the laser-processing zone.

The purpose of this work is to find ways to increase the efficiency of the implementation of the laser cutting process of cubic boron nitride using mathematical statistics methods, namely, to find ways to optimize this technology by using a multifactorial strategy for conducting the experiment.

In this work, a study of the laser cutting process of cubic boron nitride was conducted using laser experimental equipment with a power of 200 W in the pulsed mode of laser radiation generation. The pulse energy was 2 J, the pulse length was 200 μs. After laser processing, the test samples were heated on special equipment. To find the optimal processing modes, the experimental results were processed using mathematical statistics methods.

Key words: *laser cutting; superhard materials; cubic boron nitride; mathematical statistics*.

Fig.: 5. Table: 2. References: 11.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-57-68
УДК 621.91:621.941:534.1

Андрій Сергійович Манохін[1], Сергій Анатолійович Клименко[2], Марина Юріївна Копєйкіна[3], Сергій Анатолійович Клименко[4], Анатолій Олександрович Чумак[5], Катерина Валеріївна Камчатна-Степанова[6]

[1]кандидат технічних наук, старший дослідник,
старший науковий співробітник відділу «Технологічного управління якістю обробки інструментами із НТМ»
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України (Київ, Україна)
E-mail: the.manokhin@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-1479-8482. **Researcher ID**: DGN-4506-2022
SCOPUS Author ID: 37059129600

[2]доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НАН України, заступник директора з наукової роботи
Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (Київ, Україна)
E-mail: atmu@meta.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-1464-3771. **Researcher ID**: Q-8928-2019
SCOPUS Author ID: 57221904325

[3]кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу «Технологічного управління якістю обробки інструментами із НТМ»
Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (Київ, Україна)
E-mail: atmu1@meta.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-5956-5503. **Researcher ID**: FZY-5450-2022
SCOPUS Author ID: 36337661400

[4]кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
відділу «Технологічного управління якістю обробки інструментами із НТМ»
Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (Київ, Україна)
E-mail: alcon1202@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-7913-5519. **Researcher ID**: FFQ-3675-2022
SCOPUS Author ID: 57197629303

[5]кандидат технічних наук,
науковий співробітник відділу «Технологічного управління якістю обробки інструментами із НТМ»
Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (Київ, Україна)
E-mail: chumak1826ar@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-9054-3196. **Researcher ID**: AEK-3163-2022
SCOPUS Author ID: 58162161100

[6]кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів
Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (Харків, Україна)
E-mail: katerina.ks@i.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-7825-1238. **SCOPUS Author ID**: 57363551500

МОДЕЛЮВАННЯ ВІБРОПЕРЕМІЩЕНЬ ТА ОЦІНКА ВІБРОСТІЙКОСТІ ІНСТРУМЕНТІВ ПРИ РІЗАННІ З УДАРАМИ

У роботі представлено результати математичного моделювання віброперемiщень різального інструменту та оцінки вібростійкості процесу різання в умовах ударних імпульсних навантажень. Розглянуто динамічну модель пружної системи «інструмент-різцетримач-заготовка» з урахуванням зворотного зв'язку між миттєвою глибиною різання та складовими сили різання. На основі чисельного розв'язання диференційного рівняння другого порядку проведено аналіз впливу геометричних параметрів інструменту, зокрема кута нахилу різальної кромки, на амплітуду віброперемiщень та максимальні значення радіальної складової сили різання. Показано, що збільшення кута нахилу різальної кромки призводить до зниження амплітуди коливань інструменту та підвищення вібростійкості процесу різання. Встановлено, що інструменти з косокутною радіусною різальною кромкою при кутах λ = 50-60° забезпечують максимальну стабільність обробки в умовах імпульсних ударних навантажень.

Ключові слова: *вібростійкість; вібрації при різанні; різальний інструмент; ударні навантаження; динаміка різання; сила різання; косокутне різання; моделювання процесу різання; пружна система.*
Рис.: 7. Бібл.: 18.

Актуальність теми досліджень. У реальному виробництві більшість операцій механічної обробки (наприклад, точіння та фрезерування по корці литих деталей, виробів з перемінним профілем або переривчастими поверхнями) пов'язана з необхідністю видалення нерівномірного припуску і, як наслідок, нестаціонарним термобаричним навантаженням на різальний інструмент. Обробка таких деталей різанням, особливо у випадках, коли вони виготовляються з важкооброблюваних матеріалів, пов'язана з прискореним виходом інструменту з ладу в результаті інтенсивного зносу або руйнування.

© А. С. Манохін, С. А. Клименко, М. Ю. Копєйкіна, С. А. Клименко, А. О. Чумак, К. В. Камчатна-Степанова, 2026

Вібростійкість є однією з найважливіших характеристик технологічної системи, яка обумовлює здатність до опору виникненню вібрацій у зоні різання. Забезпечення вібростійкості пов'язано з визначенням режимів різання та геометричних параметрів інструментів, при яких мінімізуються вібраційні явища, та є актуальним науковим та прикладним завданням.

Постановка проблеми. Однією з основних проблем, які обмежують ефективність механообробки, є поява в зоні різання вібрації, що призводить до погіршення якості обробленої поверхні, точності, а також знижує продуктивність технології та стійкість інструменту. Тому розв'язання завдання з вивчення причин появи вібрацій та визначення підходів до підвищення вібростійкості системи різання, особливо в умовах з динамічними імпульсними навантаженнями, набуває суттєвого значення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У наукових публікаціях достатньо широко висвітлені дослідження з вивчення сил різання, температурних явищ та механізмів руйнування інструменту під час різання з динамічним навантаженням. При цьому, зважаючи на складність проведення експериментальних досліджень з динаміки процесу різання, значну увагу присвячено розробці методів моделювання процесу обробки.

Важливим етапом процесу різання, що супроводжується ударним навантаженням інструмента, є його врізання в оброблюваний матеріал у початковий момент різання. За певних умов, цей етап супроводжується руйнуванням інструменту, що оснащений різальними пластинами з різних композитів – твердих сплавів, кераміки або надтвердих композитів на основі алмазу та кубічного нітриду бору. Таке руйнування інструменту досліджувалося авторами [1–3].

Для моделювання безпосереднього процесу врізання інструменту в роботі [4] було розроблено спеціальний пристрій, створений на основі преса Хопкінсона-Кольського. На торці верхнього стрижня преса закріплювалася пластина з матеріалу інструменту, а на нижньому – пластина з матеріалу, що обробляється. Верхній стрижень із заданою швидкістю ударявся по нижньому та по сигналу, отриманому від встановлених на стрижнях тензодатчиків, визначався вплив ударного навантаження на властивості матеріалу інструменту. Як приклад, автори роботи визначили величину енергії, яка витрачається на пластичну деформацію в зоні зсуву при врізанні зразка композиту на основі алмазу в алюміній.

У роботі [5] вивчався вплив нестаціонарного навантаження під час фрезерування на температурний режим в зоні різання: тепловий потік на контактній поверхні та коливання температури різання. Створена комбінована аналітично-чисельна модель розрахунку теплового потоку дозволила враховувати різні умови контактної взаємодії у зоні різання – швидкість та температуру різання і тиск на контактній ділянці, що використано для визначення коефіцієнта тертя на передній поверхні інструменту.

При обробці в умовах динамічного навантаження досить часто спостерігається руйнування різального інструменту, яке має вигляд мікровикришування у зоні різальної кромки та сколів макрооб'ємів робочої ділянки інструменту. У таких випадках встановити величину зносу інструменту, яка найбільш часто використовується як критерій його працездатності, досить важко, адже характеристика досліджуваного параметра в цьому випадку стає не кількісною (величина фаски зносу по задні поверхні інструменту h_z), а якісною з погляду руйнування інструменту (є або ні). Але для вирішення завдань підвищення стійкості інструменту й оптимізації умов обробки із застосуванням математичних методів все ж необхідно мати для контрольованого параметра певні чисельні величини. Такою величиною може слугувати параметр, який характеризує стабільність процесу обробки, ознакою якого є сталість деякого параметра, що безпосередньо характеризує миттєвий стан системи «інструмент-різцетримач-заготовка» та контактну взає-

модію інструменту з виробом в зоні різання. До таких характеристик, значення яких можна фіксувати від приладів в кожен момент часу за допомогою АЦП, відносяться акустична емісія, віброприскорення, сила різання та деякі ін.

У роботі [6] розглянуто ряд конструктивних факторів, що впливають на ударостійкість різальних інструментів, серед них особливу увагу приділено радіусу різальної кромки, та на основі отриманих експериментальних даних сили різання при фрезеруванні загартованої сталі AISI 4340 розроблено модель прогнозування сили різання, засновану на теорії Окслі та конститутивній моделі J-C, з урахуванням впливу радіуса різальної кромки (r – 25-45 мкм). Автори встановили, що радіус різальної кромки має значний вплив на стійкість та стабільність процесу різання. Збільшення радіуса різальної кромки призводить до збільшення сил різання та зносу задньої поверхні, проте і до збільшення жорсткості та ударної стійкості різальної кромки. Розроблена модель дозволила встановити оптимальне значення радіуса різальної кромки.

Прогнозування сили різання під час обробки із динамічними навантаженнями має суттєве значення для оптимізації обробки, забезпечення стабільності процесу різання, підвищення якості поверхні та збільшення терміну служби інструменту [7].

Сьогодні розроблено широкий спектр методів та підходів для оцінки сили різання шляхом моделювання, серед яких найбільш часто використовують аналітичні, емпіричні, числові та гібридні методи. Так, у роботі [8] було застосовано алгоритми машинного навчання та метод скінченних елементів для прогнозування сил різання при обробці з ударними навантаженнями сталі AISI 4140. Встановлено, що регресія опорних векторів та моделі машинного навчання «Random Forest» дозволяє точно оцінювати складові сили різання на основі параметрів обробки, що дозволяє інтегрувати цей метод у CAM-системи.

Зазвичай в моделях доволі складно врахувати величину зносу контактних поверхонь інструменту, що впливає на точність розрахунків та можливість інтегрування в CAM-системи, проте в роботі [9] розроблена модель оцінки сили різання при фрезеруванні сплаву Ti-6Al-4V, яка враховує знос задньої поверхні інструменту та вплив вібрації.

У роботі [10] розроблено модель для оцінки сили різання on-line, яку інтегровано в систему керування оброблюваного центру. Модель базується на обчисленні коефіцієнтів питомої сили різання (SFC) за допомогою алгоритмів рекурсивного методу найменших квадратів (RLS) та фільтра Калмана (KF). Крім того, в [11] створено модель для оцінки сили різання при фрезеруванні, яка враховує вплив радіального биття інструменту при різних глибинах різання.

Моделювання процесу різання напряму залежить від результатів експериментальних досліджень з визначення складових сили різання для різних умов обробки, що змушує розробляти нові методи та методики проведення експериментальних досліджень. Так у роботі [12] запропоновано нову концепцію динамометра, що поєднує датчики навантаження та акселерометри з універсальним фільтром. Це нововведення усунуло необхідність калібрування для конкретного верстата і забезпечило точне відтворення сили різання із широкою пропускною здатністю.

Широке розповсюдження, при моделюванні процесу різання, набули нейронні мережі. У [13] розроблено нейронну мережеву модель, яка поєднує фізичні принципи з зображеннями взаємодії різця та оброблюваного матеріалу. Цей підхід покращив точність прогнозування сили, одночасно зменшуючи потребу у великих наборах експериментальних даних. У роботі [14] представлена нейронна мережа, яка здатна прогнозувати силу різання на основі аналізу потужності спожитого струму шпинделем, що дало можливість ефективно фіксувати нелінійні залежності сили різання за різних умов обробки.

Розглянуті дослідження показують різноманітність та спеціалізацію моделей для прогнозної оцінки динамічних показників процесу обробки. Проте слід зауважити, що кожна модель орієнтована на конкретні матеріали, геометричні параметри інструменту або умови процесу різання, що підкреслює постійну потребу в гнучких, експериментально перевірених моделях, придатних для реальних середовищ обробки. Водночас наявні моделі процесу різання з ударними навантаженнями, як правило, зосереджені на аналізі окремих параметрів (сил або температури різання, параметрів акустичної емісії або вібрацій) без урахування їх взаємного впливу та зворотного зв'язку між коливаннями інструменту і миттєвими змінами товщини зрізуваного шару. Недостатньо дослідженим залишається вплив геометричних параметрів різального інструменту, зокрема кута нахилу різальної кромки та її форми, на вібростійкість процесу різання в умовах імпульсного навантаження інструменту.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Таким чином, однією із недостатньо вирішених науково-технічних проблем є створення та експериментальна перевірка математичної моделі, яка б дозволяла проводити оцінку вібростійкості процесу різання при наявності ударних навантажень. Ця модель повинна враховувати імпульсний характер сили різання, а також зв'язок між вібраційними процесами та геометричними параметрами різального інструменту.

Розв'язання цієї проблеми є необхідним для обґрунтованого вибору геометричних параметрів інструменту та режимів різання, що забезпечують підвищення стабільності й надійності механічної обробки в умовах динамічного навантаження.

Метою роботи є математичне моделювання вібропереміщень різального інструменту при різанні з ударними навантаженнями та оцінка впливу геометричних параметрів інструменту, зокрема кута нахилу різальної кромки, на вібростійкість процесу обробки.

Методика досліджень. З метою оцінки впливу умов обробки на основний показник вібростійкості процесу – амплітуду коливань інструменту проведено відповідні розрахунки з урахуванням геометричних параметрів інструменту та режимів різання. При цьому, береться до уваги наявність в системі зворотного зв'язку: збільшення миттєвого значення глибини різання t призводить до росту складових сили різання, що своєю чергою за рахунок впливу на пружну систему «інструмент-різцетримач-заготовка» змінює положення вершини інструменту та значення t.

Коливання різального інструменту вздовж осі OY під дією радіальної складової сили різання за схемою, зображеною на рис. 1, описуються неоднорідним диференційним рівнянням другого ступеню:

$$m\ddot{y} + b\dot{y} + cy = Py(t, y),$$

$$\ddot{y} + 2n\dot{y} + \omega_c^2 y = \frac{1}{m} Py(t, y),$$

де для верстата типу 16К20 потрібні коефіцієнти приймемо в першому наближенні таким чином [15]:

$m = \frac{c \cdot 10^6}{\omega_c^2}$ – коефіцієнт енерції (приведена маса);

$\omega_c = 2\pi f = 2\pi \cdot 400{,}1 = 2512$ рад/с – кругова частота власних коливань;

c = 5 Н/мкм – жорсткість вузла різець-різцетримач;

m = 0,79 Н·с^2/м – приведена маса;

$b = 2mf\lambda_d$ – коефіцієнт демпфування, де f – частота власних коливань системи, λ_d – логарифмічний декремент затухання коливань (0,18 для випадку чистової та напівчистової обробки сталей та чавунів на токарних верстатів [16]).

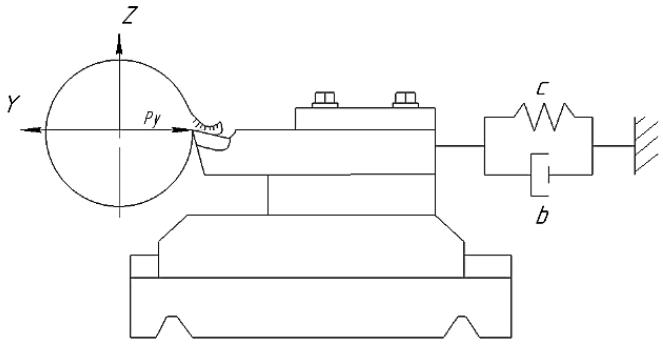


Рис. 1. Схема пружної системи «інструмент-різцетримач-заготовка» з одним ступенем свободи

Якщо b = 114,1 кг/с, тоді $n = \frac{b}{2m} = 114{,}1/2 \cdot 0{,}88 = 50{,}2$; початкові умови $y(0) = 0$, $\dot{y}(0) = 0$.

Блок-схема вирішення наведеного вище диференційного рівняння, яке описує коливання у пружній системі «інструмент-різцетримач-заготовка» шляхом моделювання в Simulink Matlab, зображена на рис. 2.

Структура алгоритму складається з суматора (*Add*), на вхідні канали якого подаються складові сигналу переміщення, швидкості та сили, величина якої залежить від миттєвого значення товщини зрізу (площі перетину зрізу) як функція від y; інтеграторів ($1/s$) для підсумування сигналів прискорення і визначення швидкості $\dot{y}$ та переміщення y; генератора імпульсної характеристики вхідного сигналу сили різання (Pulse Generator) – $Py_0(t)$, яка своєю чергою має змінну складову $k{\cdot}y(t)$, що визначається переміщенням y з відповідним коефіцієнтом і сумується зі значенням сигналу з Pulse Generator, і, таким чином, сумарний сигнал сили на вході системи становить $P(y,t) = Py_0(t) + k{\cdot}y(t)$.

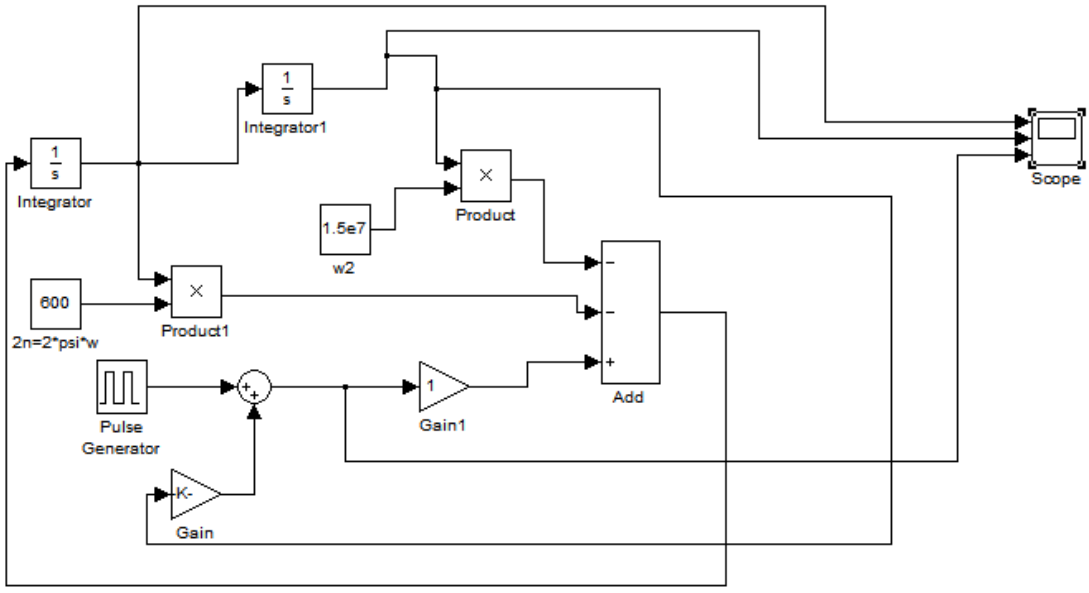


Рис. 2. Блок-схема моделювання коливань в пружній системі «інструмент-різцетримач-заготовка»

Експериментальні дослідження виконувалися на токарно-гвинторізному верстаті ФТ11 під час точіння інструментом, оснащеним різальними пластинами RNUN-1204000, SNUN-0904000 з композиту на основі полікристалічного нітриду бору (ПКНБ) Борсинит,

заготовки зі сталі ШХ15 (62-64 HRC) Ø 80 мм із шістьма повздовжніми пазами шириною 10 мм. Режими різання: t = 0,2 мм, S = 0,2 мм/об, v = 120 м/хв.

При частоті обертів заготовки 500 об/хв період виникнення дії сили приймемо таким, що дорівнює 0,025 с, а тривалість кожного імпульсу 0,019 с при скважності 0,006 с.

Використано інструменти з радіусною різальною кромкою (λ = 0–60°) та з прямолінійною різальною кромкою з кутом нахилу λ = (30–60)°.

Виклад основного матеріалу. Радіальна складова сили різання має імпульсний характер та змінюється від 0 до номінального значення, обумовленого товщиною зрізу. Крім того, коливання різця змінюють миттєве значення товщини зрізу, що також впливає на величину вимушуючої сили. Приклад моделі імпульсного навантаження на інструмент наведено на рис. 3.

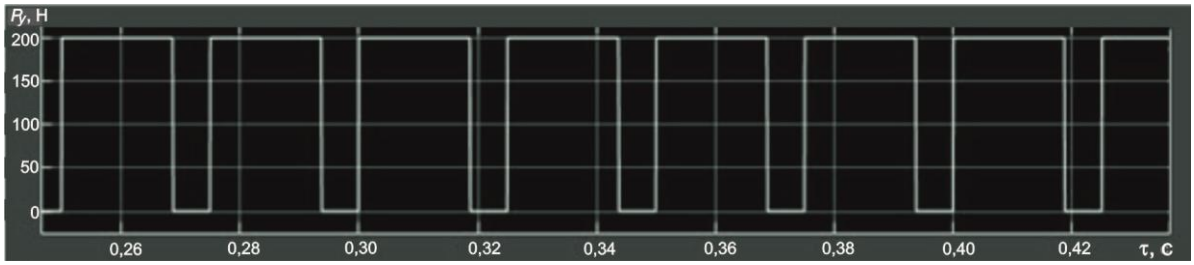
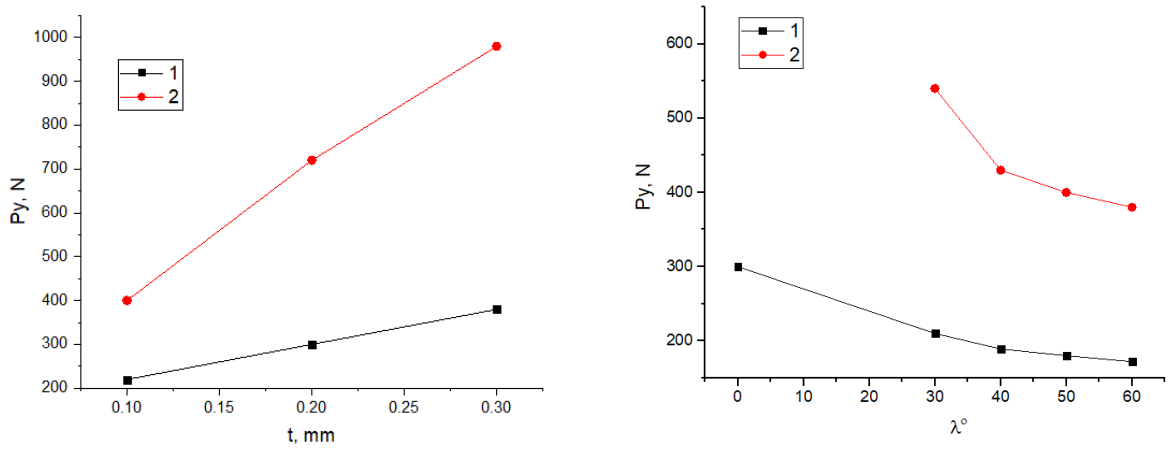


Рис. 3. Приклад моделі імпульсного навантаження на інструмент з радіусною різальною кромкою (λ = 50°)

Визначимо амплітуду вібрацій інструменту для випадків його використання з радіусною різальною кромкою з λ = 0° та і косокутних різців як із радіусною, так і з прямолінійною різальною кромками. Приймаючи, що характеристики жорсткості та демпфування системи не залежать від використаного інструменту, необхідно задати величини імпульсного навантаження – складової P_{y0} та коефіцієнту k. На основі даних [17; 18] щодо впливу глибини різання та кута нахилу різальної кромки косокутних інструментів на сили різання встановимо в першому наближенні залежності радіальної складової P_y від глибини різання та кута λ для інструментів з радіусною та прямолінійною різальною кромкою. Використавши наведені на графіку рис. 4, *а* дані та враховуючи лінійну залежність сили від глибини різання, приймемо для радіусного різця $k = 0{,}8 \cdot 10^6$ Н/м, а для косокутного інструменту з прямолінійною різальною кромкою $k = 2{,}9 \cdot 10^6$ Н/м.



а *б*

Рис. 4. Залежність складової P_y для радіусного (1) та з прямолінійною різальною кромкою (2) різців: а – від глибини різання (1 – λ = 0°; 2 – λ = 50°); б – від кута λ при t = 0,2 мм

На діаграмах (рис. 5) наведено приклади розрахунків віброколивань інструменту та коливань сили P_y як функції часу, отримані при вирішенні наведеного у методиці диференційного рівняння.

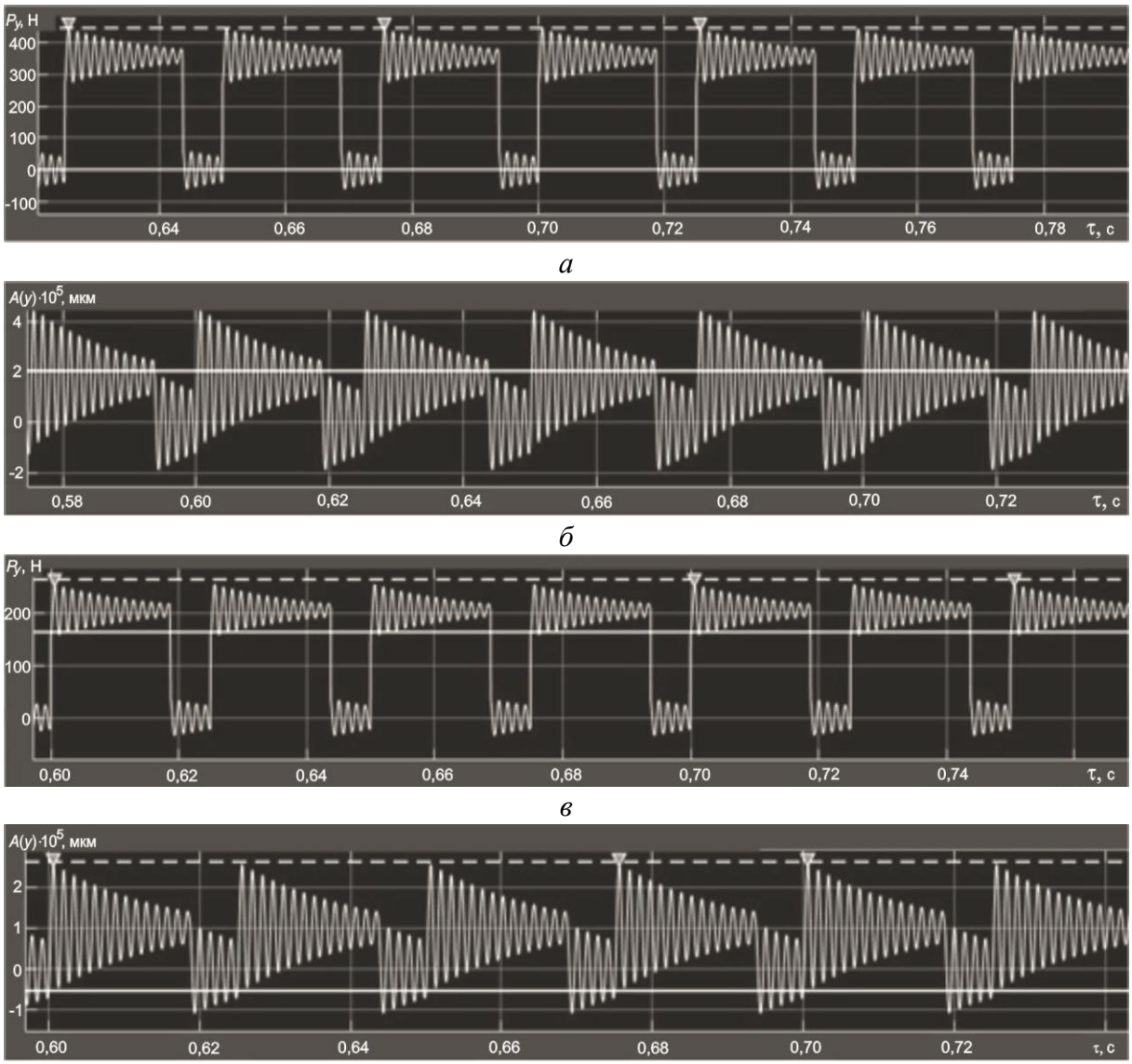


Рис. 5. Зміна сили P_y (а, в) та амплітуди вібропереміщень A(y) різця (в, г) при обробці інструментами з радіусною різальною кромкою: $\lambda = 0^o$ (а, б); $\lambda = 60^o$ (в, г)

Аналіз динамічних характеристик процесу обробки свідчить про значні величини переміщень вершини різального інструменту вздовж осі *OY* внаслідок дії вимушуючої імпульсної сили, яка інтенсивно зростає зі збільшенням миттєвого значення глибини різання.

Слід зауважити, що середнє значення сили, що діє на інструмент під час різання, вище величини періодичної вимушуючої сили: P_{ycp} = 360 Н та 200 Н при величинах P_{y0} = 300 та 180 Н. Наявність демпфування в системі різець-різцетримач-заготовка обумовлює інтенсивне зниження амплітуди вібропереміщень та коливань сили P_y в кожному з підперіодів різання.

Для порівняння на рис. 6 наведено аналогічні діаграми для косокутного різця з прямолінійною різальною кромкою, для якого характерним є суттєво вищі, у порівнянні із

радіусним інструментом, величини ширини зрізу та відношення ширини до середньої товщини зрізу. Як видно, величини сил, вібропереміщень та амплітуди їхніх коливань в такому випадку є суттєво вищими.

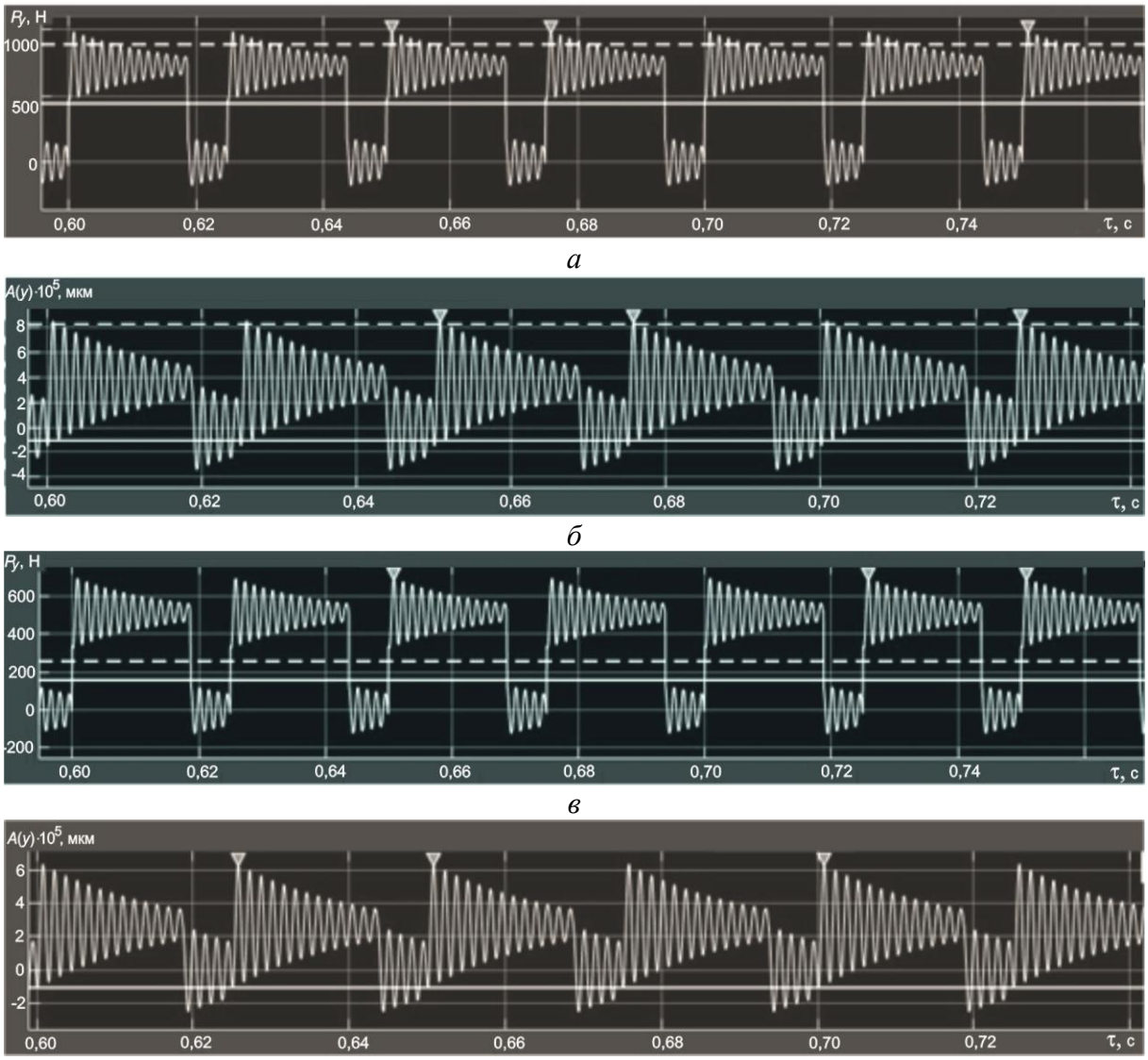
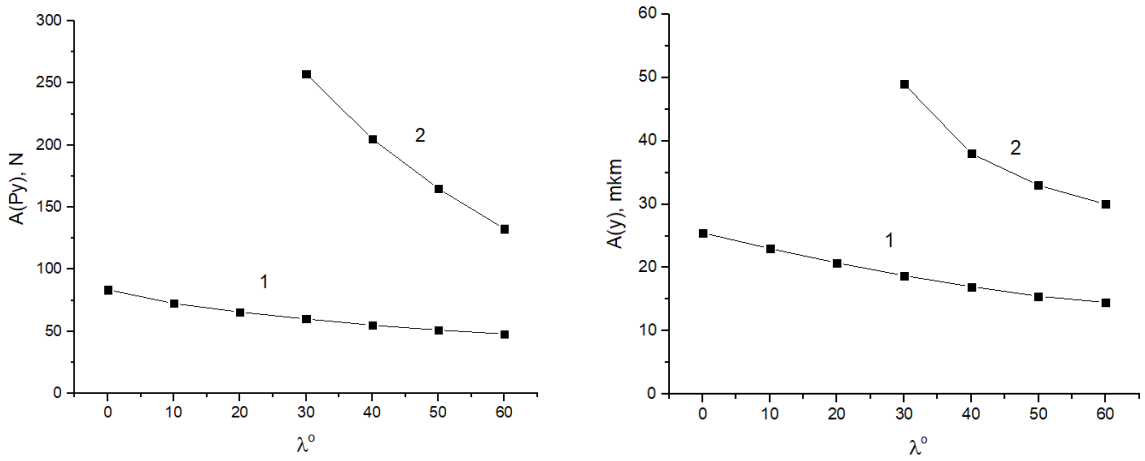


Рис. 6. Зміна сили P_y (а, в) та амплітуди вібропереміщень A(y) різця (в, г) при обробці косокутним інструментом з прямолінійною різальною кромкою: а, б – $\lambda = 30^o$; в, г – $\lambda = 60^o$

На рис. 7 наведено залежності максимальних величин сили $A(P_{ymax})$ (*а*) та амплітуди вібропереміщень в напрямку *OY* (*б*) від величини кута нахилу різальної кромки.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок про значний вплив кута нахилу різальної кромки інструмента на дані характеристики – зі зростанням λ величини амплітуди вібропереміщень $A(P_y)$ та $A(y)$ знижуються. Зменшення амплітуди вібропереміщень при зміні кута λ від 30° до 60° становить 1,3 та 1,6 раза для інструментів з радіусною та прямолінійною різальними кромками відповідно. У порівнянні з інструментом з радіусною різальною кромкою з $\lambda = 0^o$ цей показник для радіусного різця з $\lambda = 60^o$ зменшується в 1,75 раза.



а *б*

Рис. 7. Вплив кута нахилу різальної кромки λ на максимальну амплітуду сили різання $A(P_{ymax})$ (а) та амплітуду вібропереміщень A(y) (б) для інструменту з радіусною різальною кромкою (1) та косокутного інструменту з прямолінійною різальною кромкою (2)

Вказане свідчить про збільшення вібростійкості системи різання – вібростійкість інструмента з радіусною різальною кромкою суттєво (у 2,1 раза) вища у порівняні з різцем з прямолінійною різальною кромкою. Як висновок, з огляду на забезпечення максимальної стабільності обробки різанням, в умовах імпульсних ударних навантажень доцільним є використання косокутного інструменту з радіусною кромкою при кутах λ = (50–60)°. Аналіз динамічних характеристик процесу обробки свідчить про значні величини переміщень вершини різального інструменту вздовж осі *OY* внаслідок дії вимушуючої імпульсної сили, яка інтенсивно зростає зі збільшенням миттєвого значення глибини різання.

Висновки. Запропоновано динамічну математичну модель пружної системи «інструмент-різцетримач-заготовка», яка враховує імпульсний характер радіальної складової сили різання та наявність зворотного зв’язку між миттєвою глибиною різання і коливаннями інструменту.

Показано, що в умовах ударних навантажень амплітуда вібропереміщень вершини різального інструменту суттєво залежить від геометрії різальної кромки та величини кута її нахилу.

Встановлено, що зі збільшенням кута нахилу різальної кромки λ спостерігається зниження максимальних значень радіальної складової сили різання та амплітуди вібропереміщень інструменту, що свідчить про підвищення вібростійкості процесу різання.

Порівняльний аналіз показав, що інструмент з косокутною радіусною різальною кромкою має вищу вібростійкість у порівнянні з косокутним інструментом з прямолінійною різальною кромкою, зменшуючи амплітуду коливань до 2,1 раза.

Для забезпечення максимальної стабільності процесу різання в умовах імпульсних ударних навантажень доцільним є використання косокутного інструменту з радіусною різальною кромкою при кутах нахилу λ = (50–60)°.

Джерело фінансування. Роботу виконано в рамках бюджетної теми НАН України «Дослідження процесів обробки високо твердих сталей та сплавів інструментами з ПНТМ на основі КНБ в умовах динамічного навантаження» (№ держреєстрації 0122U000403).

Список використаних джерел

1. Мазур, М. П., Внуков, Ю. М., Грабченко, А. І., Доброскок, В. Л., & Залога, В. О. (2025). *Основи теорії різання матеріалів: Підручник* (5-те вид., перероб. і доп.). Львів: Новий Світ-2000

2. Манохін, А. С., Клименко, С. Ан., Клименко, С. А., Копєйкіна, М. Ю., Мельнійчук, Ю. О., Чумак, А. О., & Найденко, А. Г. (2025). Визначення стабільності процесу різання в умовах динамічного навантаження. *Технічна інженерія*, (1(95)), 67–75.

3. Залога, В. О., & Шаповал, Ю. В. (2024). *Методологічні основи підвищення ефективності оброблення деталей шляхом керування динамікою процесу високошвидкісного точіння з високими частотами обертання шпинделя*. Сумський державний університет

4. Devin, L. M., Lytvyn, P. M., Ivakhnenko, S. O., & Zanevskyi, O. O. (2024). Methodology for studying brittle fracture of HTHP diamond single crystals by crack propagation analysis under shock load. *Journal of Superhard Materials, 46*(1), 14–22.

5. Karaguzel, U. (2021). Transient multi-domain thermal modeling of interrupted cutting with coated tools. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 116*, 345–361.

6. Hopkins, C., Clarke, T., Yussefian, N. Z., & Hosseini, A. (2023). On modelling the cutting forces and impact resistance of honed milling tools. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 48*(1), 53–67.

7. Nguyen, T. A., & Tran, T. T. (2025). Cutting force prediction in end milling processes: Analytical models and applications. *Applications in Engineering Science, 23*, 100250.

8. Charalampous, P. (2021). Prediction of cutting forces in milling using machine learning algorithms and finite element analysis. *Journal of Materials Engineering and Performance, 30*(3), 2002–2013.

9. Gao, G., Xia, Z., Su, T., Xiang, D., & Zhao, B. (2021). Cutting force model of longitudinal-torsional ultrasonic-assisted milling Ti-6Al-4V based on tool flank wear. *Journal of Materials Processing Technology, 291*, 117042.

10. Farhadmanesh, M., & Ahmadi, K. (2021). Online identification of mechanistic milling force models. *Mechanical Systems and Signal Processing, 149*, 107318.

11. Chen, Y., Lu, J., Deng, Q., Ma, J., & Liao, X. (2022). Modeling study of milling force considering tool runout at different types of radial cutting depth. *Journal of Manufacturing Processes, 76*, 486–503.

12. Totis, G., Bortoluzzi, D., & Sortino, M. (2024). Development of a universal, machine tool independent dynamometer for accurate cutting force estimation in milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 104151.

13. Xu, K., Yingguang, L., Jiachen, Z., & Gengxiang, C. (2021). ForceNet: An offline cutting force prediction model based on neuro-physical learning approach. *Journal of Manufacturing Systems, 61*, 1–15.

14. Peng, D., Li, H., Dai, Y., Wang, Z., & Ou, J. (2022). Prediction of milling force based on spindle current signal by neural networks. *Measurement, 205*, 112153.

15. Хорошайло, В. В. (2016). Підвищення ефективності розточування отворів на токарних верстатах шляхом створення вібростійкої інструментальної системи (Автореф. дис. канд. техн. наук). ДДМА, Краматорськ.

16. Ткаченко, Я. Є. (2021). *Усунення вібрацій при багатолезовій обробці* (Магістерська дисертація). НТУ України «КПІ імені Ігоря Сікорського».

17. Манохін, А. С. (2009). *Підвищення продуктивності чистового точіння загартованих сталей косокутним однокромочним інструментом з ПНТМ на основі КНБ* (Автореф. дис. канд. техн. наук). ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України.

18. Клименко, С. А. (2015). *Підвищення стійкості інструментів із полікристалічного кубічного нітриду бору при точінні загартованих сталей застосуванням покриття* (Автореф. дис. канд. техн. наук). ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України.

References

1. Mazur, M.P., Vnukov, Yu.M., Grabchenko, A.I., Dobroskok, V.L., Zaloga, V.O. (2025). Osnovy teorii rezanija materialov. [Fundamentals of the Theory of Material Cutting: A Textbook (5th ed., revised and expanded).] Lviv: Novyi Svit-2000. 457.

2. Manokhin, A. S., Klymenko, S. An., Klymenko, S. A., Kopeikina, M. Yu., Melniychuk, Yu. O., Chumak, A.O., Naidenko, A.G. (2025). Vyznachennja stabilnosti protsessu rizannja v umavah dynamichnogo navantazhennja [Determining the stability of the cutting process under dynamic loading conditions]. *Tekhnichna inzheneriia - Technical Engineering*, *1*(95). 67–75.

3. Zaloga, V.O., Shapoval, Y.V. (2024). *Metodologichni osnovy pidvystchennja efektyvnosti obroblennja detaley shljahom keruvannja dynamikoyu protsessu vysokoshvydkisnogo tochinnja z vysokymy hastotamy obertannja shpindelja [Methodological foundations for improving the efficiency of part machining by controlling the dynamics of the high-speed turning process at high spindle speeds].* Sumy State University.

4. Devin, L. M., Lytvyn, P. M., Ivakhnenko, S. O., & Zanevskyi, O. O. (2024). Methodology for studying brittle fracture of HTHP diamond single crystals by crack propagation analysis under shock load. *Journal of Superhard Materials, 46*(1), 14–22.

5. Karaguzel, U. (2021). Transient multi-domain thermal modeling of interrupted cutting with coated tools. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 116*, 345–361.

6. Hopkins, C., Clarke, T., Yussefian, N. Z., & Hosseini, A. (2023). On modelling the cutting forces and impact resistance of honed milling tools. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 48*(1), 53–67.

7. Nguyen, T. A., & Tran, T. T. (2025). Cutting force prediction in end milling processes: Analytical models and applications. *Applications in Engineering Science, 23*, 100250.

8. Charalampous, P. (2021). Prediction of cutting forces in milling using machine learning algorithms and finite element analysis. *Journal of Materials Engineering and Performance, 30*(3), 2002–2013.

9. Gao, G., Xia, Z., Su, T., Xiang, D., & Zhao, B. (2021). Cutting force model of longitudinal-torsional ultrasonic-assisted milling Ti-6Al-4V based on tool flank wear. *Journal of Materials Processing Technology, 291*, 117042.

10. Farhadmanesh, M., & Ahmadi, K. (2021). Online identification of mechanistic milling force models. *Mechanical Systems and Signal Processing, 149*, 107318.

11. Chen, Y., Lu, J., Deng, Q., Ma, J., & Liao, X. (2022). Modeling study of milling force considering tool runout at different types of radial cutting depth. *Journal of Manufacturing Processes, 76*, 486–503.

12. Totis, G., Bortoluzzi, D., & Sortino, M. (2024). Development of a universal, machine tool independent dynamometer for accurate cutting force estimation in milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 104151.

13. Xu, K., Yingguang, L., Jiachen, Z., & Gengxiang, C. (2021). ForceNet: An offline cutting force prediction model based on neuro-physical learning approach. *Journal of Manufacturing Systems, 61*, 1–15.

14. Peng, D., Li, H., Dai, Y., Wang, Z., & Ou, J. (2022). Prediction of milling force based on spindle current signal by neural networks. *Measurement, 205*, 112153.

15. Khoroshailo, V. V. (2016). *Pidvystchennja efektyvnosti roztochuvannja otvoriv na tokarnyh verstatah shljahom stvorennja vibrostiykoy instrumental'noy systemy [Improving the efficiency of bore boring on lathes by developing a vibration-resistant tooling system*] [Abstract of a PhD thesis in Engineering; DDMA].

16. Tkachenko, Ya. E. (2021). *Usunennja vibratsiy pry bagatolezovoy obrobtsy [Vibration suppression in multi-blade machining]* [Master's thesis; NTU Ukrainy "KPI named after Igor Sikorskyi"].

17. Manohin, A.S. (2009). *Pidvystchennja produktivnosti chistovogo tohinnja zagartovanyh staley kosokutnym odnokromochnym instrumentom z PNTM na osnovi KNB [Improving the productivity of finish turning of hardened steels using a single-edge, oblique-cut tool made from PNTM based on KNB]* [Abstract of a PhD thesis in Engineering; INM bamed after V.M. Bakul NAN Ukrainy].

18. Klymenko, S.A. (2015). *Pidvystchennja stiykosti instrumentiv is polikrystalichnogo kubichnogo nitrydu boru pry tochinni sagartovanyh staley zastosuvannjam pokryttiv [Improving the wear resistance of polycrystalline cubic boron nitride tools during the turning of hardened steels through the application of coatings]* [Abstract of a PhD thesis in Engineering; INM named V. M. Bakul NAN Ukrainy].

Дата першого надходження статті до видання: 12.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 02.01.2026

UDC 621.793: 621.81: 548

Andrii Manokhin[1], Sergii Klymenko[2], Maryna Kopieikina[3], Serhii Klymenko[4], Anatolii Chumak[5], Kateryna Kamchatna-Stepanjva[6]

[1] Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,
Senior Researcher of the Department of Technological Management of Quality of Processing with SHM Tools
V. Bakul Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
E-mail: the.manokhin@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-1479-8482. **Researcher ID**: DGN-4506-2022
SCOPUS Author ID: 37059129600

[2]Doctor of Technical Sciences, Professor,
Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Deputy Director for Research
V. Bakul Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
E-mail: atmu@meta.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-1464-3771. **Researcher ID**: Q-8928-2019
SCOPUS Author ID: 57221904325

[3]Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,
Senior Researcher of the Department of Technological Management of Quality of Processing with SHM Tools
V. Bakul Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine),
E-mail: atmu1@meta.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-5956-5503. **Researcher ID**: FZY-5450-2022
SCOPUS Author ID: 36337661400

[4]Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,
Senior Researcher of the Department of Technological Management of Quality of Processing with SHM Tools
V. Bakul Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine),
E-mail: alcon1202@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-7913-5519. **Researcher ID**: FFQ-3675-2022
SCOPUS Author ID: 57197629303

[5]Candidate of Technical Sciences,
Researcher of the Department of Technological Management of Quality of Processing with SHM Tools
V. Bakul Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine),
E-mail: chumak1826ar@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-9054-3196. **Researcher ID**: AEK-3163-2022
SCOPUS Author ID: 58162161100

[6]Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering and Metal-Cutting Machine Tools
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" (Kharkiv, Ukraine),
E-mail: katerina.ks@i.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-7825-1238. **SCOPUS Author ID**: 57363551500

MODELING OF VIBRATION TRANSFER AND EVALUATION OF VIBRATION RESISTANCE OF TOOLS DURING IMPACT CUTTING

The paper presents the results of mathematical modeling of vibration displacements of the cutting tool and assessment of vibration resistance of the cutting process under shock impulse loads. The dynamic model of the elastic system "tool-tool holder- workpiece" is considered, taking into account the feedback between the instantaneous cutting depth and the components of the cutting force. Based on the numerical solution of the second-order differential equation, an analysis of the influence of the geometry of the tool, in particular the angle of inclination of the cutting edge, on the amplitude of vibration displacements and the maximum values of the radial component of the cutting force is carried out. It is shown that an increase in the angle of inclination of the cutting edge leads to a decrease in the amplitude of tool oscillations and an increase in the vibration resistance of the cutting process. It is established that tools with an oblique radius cutting edge at angles λ = 50-60° provide maximum machining stability under conditions of impulse shock loads.

Keywords: *vibration resistance; vibrations during cutting; cutting tool; impact loads; cutting dynamics; cutting force; bevel cutting; modeling of the cutting process; elastic system.*

Fig.: 7. References: 18.

Манохін А. С., Клименко С. А., Копєйкіна М. Ю., Клименко С. А., Чумак А. О., Камчатна-Степанова К. В. Моделювання віброперемiщень та оцінка вібростійкості інструментів при різанні з ударами. *Технічні науки та технології*, 2026. № 1(43). С. 57-68. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-57-68.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-69-78
УДК 621.375.826:621

Ігор Андрійович Шапошник

старший науковий співробітник
Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України (Київ, Україна)
E-mail: shaposhnyk.ihor@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0001-9915-2674

ВПЛИВ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОВЕРХОНЬ МЕТАЛІВ НА ЇХ ЛАЗЕРНЕ РІЗАННЯ

У цій роботі зосереджено увагу на проблемі та запропоновані попередні напрямки досліджень умов поглинання лазерного променя в металах і сплавах різного типу шорсткості, із забрудненнями та оксидами на поверхні. Проаналізовано різні механізми лазерного поглинання, що має важливе значення для вивчення лазерної обробки металів. Доведено, що поглинання лазерного світла залежить від низки різних параметрів, що містять і властивості лазера, і металу. Надано більш реалістичну інформацію про лазерне різання металів та сплавів в умовах виробництва й віддзеркалення лазерного світла поверхнями різного стану шорсткості.

Ключові слова: *лазерні технології; лазерне різання; ручне лазерне різання; поглинання лазерного променя; відбиття лазерного променя; шорсткість поверхонь при лазерному різанні; кут нахилу лазерного інструменту.*

Рис.: 1. Бібл.: 12.

Актуальність теми дослідження. Використання лазерних технологій є наразі одним із найбільш прогресивних напрямків у промисловості, який в останні роки набув значного розвитку. Застосування лазерного випромінювання є ефективним процесом обробки різноманітних матеріалів. Лазерні технології відрізняються від традиційних методів обробки відсутністю контактних явищ у зоні обробки та можливістю дозованого інтенсивного підведення енергії до поверхні виробу; локальністю фізичних процесів у зоні термічного впливу та відсутністю значних деформацій оброблюваних деталей; можливістю обробки майже будь-яких матеріалів, незалежно від їх механічних властивостей, з високою якістю і продуктивністю. Дана технологія має високий рівень ефективності, а також екологічної чистоти. У деяких випадках лазерна технологія є єдиною для вирішення важливих технологічних завдань [1]. При лазерній обробці металів розуміння фундаментальних принципів поглинання поверхнею світла від лазерного променя відіграє важливу роль у визначенні оптимальних параметрів та умов обробки. Поглинання світла від лазерного променя залежить від низки різних параметрів. До них належать такі параметри лазера, як інтенсивність, довжина хвилі, поляризація та кут падіння, а також варто зазначити щодо параметрів матеріалу, таких, як: хімічний склад, температура, шорсткість, оксидні шари та забруднення на поверхні. Великі теоретичні та експериментальні дані про поглинання світла різноманітними матеріалами з чистими гладкими, вільними від забруднень поверхнями контрастують з відносно обмеженою інформацією про метали та сплави, що використовуються в реальних умовах виробництва [4].

Вищезазначені умови поглинання та відбиття лазерного променю від різних типів поверхонь вкрай важливі при ручній лазерній обробці металів та сплавів, особливо при різанні, коли промінь сфокусований у вузький пучок при високій потужності та частоті. При ручному різанні металів з малою шорсткістю складно зберігати кут нахилу інструменту відносно поверхні, тому відбиття променя від неї може завдати шкоди як оператору, так і обладнанню. Враховуючи ці фактори, дослідження таких умов обробки поверхонь металів та сплавів особливо важливі.

Постановка проблеми. Обробка металів лазерами досягла високого рівня розвитку та широкого застосування у промисловості. Лазерні технології використовуються для різання, свердління, зварювання, формування, гравіювання, маркування, загартування та інших форм обробки поверхні металів у широкому спектрі сучасних галузей промисловості, а саме: автомобільній, аерокосмічній, мікроелектронній та суднобудівній промисловості.

Загальним принципом для всіх лазерних технологій є те, що сфокусоване лазерне світло перетворюється на тепло всередині матеріалу. У галузі оптики дослідження взаємодії

© І. А. Шапошник, 2026

світла з металами зазвичай зосереджувалися на чистих металевих елементах з максимально гладкими та чистими поверхнями. Це зрозуміло з погляду пошуку дотичних точок з існуючими теоріями фізики твердого тіла. Однак, метали та сплави, що зустрічаються в реальних умовах обробки лазерами, мають різні варіанти текстури та шорсткості, а також шари оксидів на своїх поверхнях. Обмежена кількість експериментальних даних та математичних моделей для цих видів неідеальних, але більш реалістичних поверхонь, є обмеженням для застосування лазерної обробки металів та сплавів. Отже, для отримання більш точних даних про поглинання лазерного світла та вирішення проблем теплопровідності при лазерній обробці різних поверхонь необхідні дослідження.

Основною мотивацією для цього дослідження було надання більш реалістичної інформації про лазерне різання металів та сплавів в умовах виробництва й віддзеркалення лазерного світла поверхнями різного стану шорсткості, а також при наявності шарів оксидів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Світло, що падає на поверхню матеріалу, може відбиватися, проходити крізь нього або поглинатися. Всі ці явища відбуваються певною мірою. Для того щоб лазерна обробка була ефективною, лазерне світло має поглинатися матеріалом. У 2007 році це досліджували науковці Д. Бергстрьом, А. Каплан та Дж. Пауел з Технологічного університету Лулео, Швеція та прийшли до висновку, що поглинання лазерного променя матеріалами залежить від низки факторів. Основними серед яких є: інтенсивність, довжина хвилі, поляризація та кут падіння лазерного променя, а також властивості матеріалу, такі як: склад, температура, шорсткість поверхні, оксидні шари та забруднення. Також вищезазначеними науковцями було проведено дослідження щодо вимірювання та кількісної оцінки кількості лазерного світла, що поглинається металом, а також за допомогою лазерної калориметрії, вимірюючи коефіцієнт відбиття, використовуючи рефлектометри [4]. Ними було запропоновано математичні моделі, що використовуються для опису взаємодії між лазерним світлом та металевою поверхнею.

Дослідники з Дрезденського технологічного університету зосереджували свої дослідження на останніх розробках лазерного різання металів. Основну увагу вони приділили різанню потужними лазерами безперервного випромінювання в нижньому та високому інфрачервоному діапазонах. Також були досліджені останні розробки в галузі різання плавленням товстих листів металів, зокрема, досліджено позитивний вплив динамічного формування променя. Науковцями надано аналіз майбутніх тенденцій лазерного різання [6].

Учені з Національного технологічного інституту, Аллахабад, Індія, вивчаючи застосування лазерного променя для різання світловідбиваючих листових металів, таких, як алюміній, запропонували метод оптимізації якості, який називається методологією Тагучі, для пошуку оптимальних параметрів різання світловідбиваючого листа. Всі кроки методу Тагучі, а саме: вибір ортогонального масиву, обчислення співвідношення сигнал/шум, визначення оптимального налаштування параметрів та дисперсійний аналіз - були виконані за допомогою розробленого програмного забезпечення [7].

Більшість вищезазначених досліджень були зосереджені на вдосконаленні процесу лазерного різання та визначенні впливу різних параметрів лазерного променя й особливостей поверхні матеріалів на якість різання. Більшість матеріалів, що використовувалися в експериментах з лазерного різання, були або металами з чистою полірованою поверхнею, або з вкрай грубою поверхнею з великою шорсткістю обробки. Не було проведено порівняльного аналізу щодо впливу різних типів поверхонь на лазерне різання, особливо в умовах ручного режиму. Слід зазначити, що проведено мало експериментів з визначення тієї величини шорсткості поверхні, починаючи з якої відбитий від поверхні металу промінь може завдати шкоди оператору чи обладнанню. Наскільки відомо, жодні дослідження не були зосереджені на лазерному різанні полірованих поверхонь різноманітних металів та сплавів у ручному режимі з огляду на умови поглинання цими матеріалами лазерного променя.

Мета дослідження. У розділі фізики, що стосується оптики матеріалів, дослідження взаємодії світла з металами зазвичай зосереджувалися на чистих металевих елементах з максимально гладкими та чистими поверхнями. Для світла, що падає вертикально до поверхні, поглинання збільшується зі збільшенням шорсткості поверхні. Однак для світла, що падає під кутом до поверхні, залежність між поглинанням та шорсткістю поверхні є більш складною. Метали та металеві сплави, що зустрічаються в реальних умовах обробки лазерами, мають різні форми текстури та шорсткості поверхонь, а також мають шари оксидів зверху. Наприклад, у деяких випадках поглинання може зростати, падати та знову зростати зі збільшенням шорсткості поверхні. Через те, що глибина проникнення інфрачервоного та видимого світла в поверхню металу є невеликою (десятки нанометрів), поглинання є значною мірою поверхневим явищем і дуже сильно залежить від властивостей поверхні металу, а саме: шорсткості та текстури.

Метою цієї роботи є дослідження закономірностей поглинання лазерного випромінювання металами та сплавами з різним ступенем шорсткості, текстури поверхні, а також за наявності оксидних шарів і поверхневих забруднень в умовах, наближених до виробничих. Також увагу в статті зосереджено на отриманні експериментально та фізично обґрунтованих даних щодо поглинання лазерного світла металевими поверхнями з різним станом поверхні в промислових умовах обробки для підвищення ефективності технологічних процесів лазерного різання, що є важливим в умовах сучасного виробництва.

Виклад основного матеріалу. Обробка металів лазерами дуже поширена в сучасній промисловості. Великий спектр промислових лазерів використовується для різання, свердління, зварювання, гравіювання, маркування, загартування та інших форм обробки різних матеріалів, у тому числі металів та сплавів у широкому спектрі сучасних галузей промисловості.

Невдовзі після появи першого рубінового лазера в 1960 році почали з'являтися експериментальні дослідження впливу лазера на матеріали. Перші розроблені лазери були занадто слабкими та занадто нестабільними для будь-якого промислового використання, але сучасні лазери здатні обробляти різноманітні матеріали з надзвичайною ефективністю. Стають доступними вищі потужності лазера, розширена кількість довжин хвиль, досліджується та впроваджується все більше і більше застосувань лазера в промислових цілях. Для того щоб лазерна обробка матеріалу була можливою та ефективною, електромагнітна енергія лазерного світла повинна перетворюватись на теплову енергію всередині матеріалу. Саме цей тип енергії, та, що поглинена матеріалом, створює потрібний ефект для різання, зварювання, свердління тощо. Поглинання лазерного світла залежить від низки різних параметрів, що є характеристиками як лазера, так і матеріалу. Важливими параметрами лазера є довжина хвилі лазера, кут падіння променя на поверхню металу та поляризація променя, яка пов'язана з орієнтацією електричного поля у світловій хвилі. За деяких обставин вона також може залежати від інтенсивності, яка є, в свою чергу, комбінацією потужності та розміру фокусної плями лазерного променя. Основним параметром матеріалу, що визначає кількість поглиненого світла, є хімічний склад матеріалу, незалежно від того, чи маємо ми справу з чистим елементом (наприклад, мідь, залізо, алюміній тощо), чи зі сплавом (наприклад, латунь або легована сталь) [5]. Але незалежно від складу, світло завжди взаємодіє з електронами всередині металу або сплаву, оскільки світло є електромагнітною хвилею, а електричні та магнітні поля взаємодіють лише із зарядженою речовиною (атомні ядра зазвичай настільки важкі, що їх не можна легко переміщувати, і їхнім впливом часто нехтують). Електрони будуть прискорюватися електричним полем, і через різні зіткнення з іншими складовими металу енергія буде передаватися до решітки атомної структури твердого тіла.

Коли енергія передається металу, він нагрівається, і з підвищенням температури кількість поглиненого світла може змінюватися, оскільки як електрони, так і атоми кристалічної решітки в металі отримують кінетичну енергію, що впливатиме на частоту зіткнень. Поглинання також сильно залежить від властивостей поверхні металу або сплаву. Більшість реальних поверхонь не є ідеально пласкими (навіть майже ідеальні дзеркала) і мають певний ступінь текстури та шорсткості, що впливає на їхню оптичну поведінку [10]. Заглиблення та западини можуть «затримувати» частину світла і тим самим посилювати поглинання. На рис. 1 показано поверхні металів від полірованої поверхні до забрудненої іржавої.

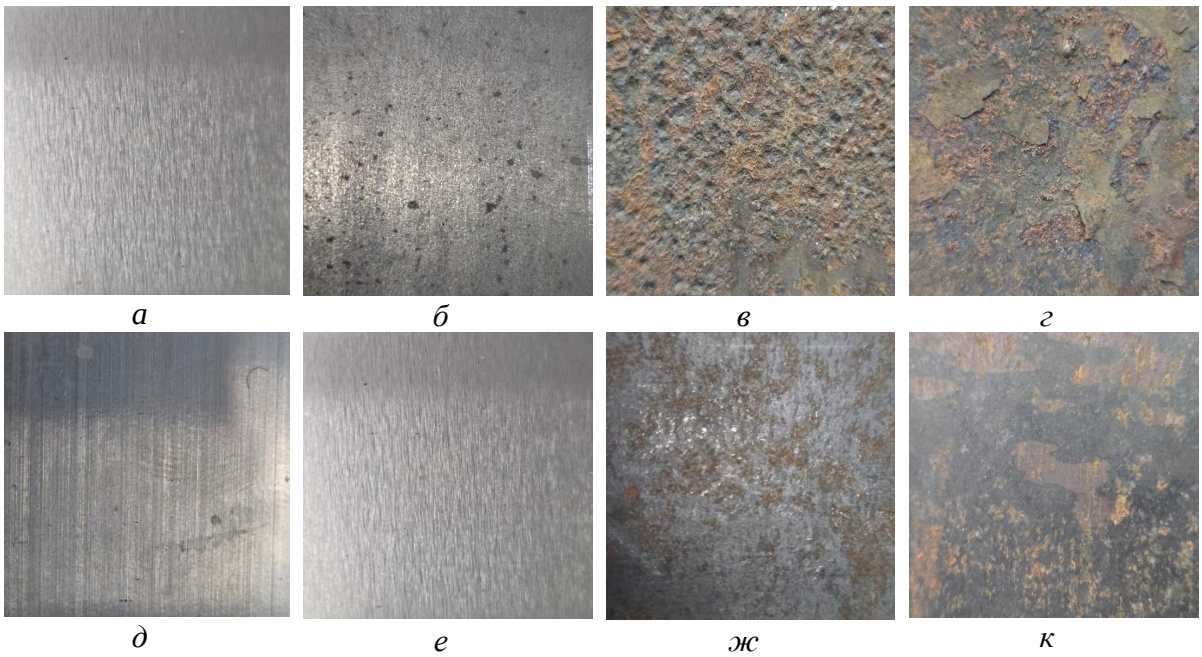


Рис. 1. Різні типи поверхонь металів

Джерело: розроблено авторами.

Метали також природно мають шар (або кілька шарів) оксидів на поверхні, і хімічні та оптичні властивості оксидів часто можуть дуже відрізнятися від властивостей металу або сплаву під ними. Тоді можливо, наприклад, отримати ситуацію, зображену на рис. 2, де світло проходить шаром оксиду, що може або збільшити поглинання, або відбитись від нього.

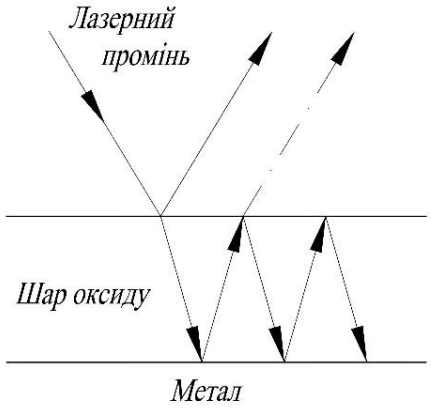
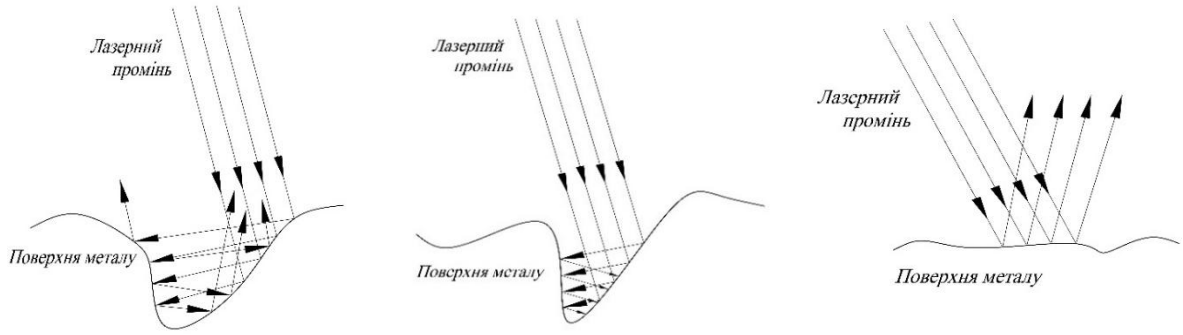


Рис. 2. Оксидна поверхня може як відбивати світло, так і поглинати.

Джерело: розроблено авторами.

Зрештою, такі забруднення, як: бруд, олія або пил - також змінюють потенціал поглинання металевої поверхні. Це може містити речовини, що залишилися на попередніх етапах обробки (таких як полірування або фрезерування), внаслідок гальванічної обробки або навіть при виготовленні прокату самого металу чи сплаву.

Отже, залежно від типу поверхні, з огляду на його шорсткість та оксидний шар, лазерний промінь може як поглинатись, так і відбиватись від поверхні. З галузі оптики твердого тіла маємо, що взаємодія світла з твердими матеріалами, містить явища поглинання, випромінювання, відбиття, проходження та розсіювання. Усі ці властивості фундаментально пов'язані з енергетичними станами електронів в атомах усередині твердого тіла, які утворюють енергетичні зони замість дискретних рівнів, як в окремих атомах. Поглинання світла відбувається, коли енергія фотона, що падає, відповідає різниці енергій між двома електронними станами, що переводить електрон на вищий енергетичний рівень. Натомість частина світла відбивається, коли зіштовхується з перепоною у вигляді межі між двома середовищами з різними показниками заломлення. Падіння лазерного променя на поліровану поверхню (де відсутній великий перепад у текстурі на поверхні) та забруднену іржаву поверхню показано на рис. 3.



а *б* *в*

Рис. 3. Варіанти відбиття лазерного променя від різних поверхонь

Джерело: розроблено авторами.

Для того щоб лазерне різання було ефективним, лазерний промінь має поглинатися матеріалом. Для забезпечення ефективного процесу необхідно передати якомога більше енергії падаючого випромінювання на заготовку. Ця ефективність передачі описується поглинаючою здатністю зразка *P*. Поглинаюча здатність визначається як співвідношення між поглиненою енергією та енергією, що не була поглинена. Поглинаюча здатність змінюється під час процесу нагрівання та є функцією оптичних властивостей зразка, а також властивостей електромагнітної хвилі. Важливими властивостями в цьому відношенні для лазерного променя є потужність, довжина хвилі (γ), кут падіння, а також для матеріалу - це хімічний склад (наприклад, чисті метали, сплави, полімери, кераміка, композити тощо), температура, шорсткість поверхні, поверхневі та об'ємні дефекти та домішки (наприклад, частинки пилу, абразиви, тріщини, пори, оксиди тощо) [11].

Закон Бугера-Ламберта-Бера для металів описує процес експоненціального згасання електромагнітної хвилі (світла) при її проникненні вглиб металу. У фізиці твердого тіла він, зокрема, пояснює, чому метали є непрозорими. Для твердих тіл, зокрема металів, інтенсивність світла *I* на глибині *z* визначається формулою

$$I(z) = I_0 \cdot e^{-\alpha z}, \quad (1)$$

де I_0 – інтенсивність світла на поверхні металу, α – коефіцієнт поглинання, що характеризує здатність металу поглинати енергію, z – глибина проникнення світла в металі. Коефіцієнт поглинання своєю чергою пов'язаний з уявною частиною комплексного показника заломлення k та визначається за формулою

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\gamma}, \quad (2)$$

де γ – довжина хвилі. У металах є вільні електрони, які реагують на електричне поле світлової хвилі. Вони поглинають енергію фотонів, переходячи на вищі енергетичні рівні в межах зони провідності. Частина падаючого світла не поглинається, а відбивається від поверхні саме через взаємодію з електронним газом (металевий блиск). Для видимого світла коефіцієнт поглинання α у металів надзвичайно високий. Світло затухає вже на відстані близько 0,1 мкм від поверхні. Оптичну константу k можна розрахувати з комплексної діелектричної проникності

$$\varepsilon = \varepsilon_1 - i\varepsilon_2, \quad (3)$$

використовуючи рівняння

$$k^2 = (-\varepsilon_1 + \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2})/2. \quad (4)$$

Залежність оптичної константи k від потужності світла, а також довжини хвилі та параметрів, що характеризують хімічний склад матеріал, викликає великий інтерес. Саме тому були розроблені різні методи для експериментального визначення цих властивостей, що занесені у спеціалізовані бази даних. Проте ці дані отримані здебільшого для чистих матеріалів за кімнатної температури з чистою та гладкою поверхнею.

Аналізуючи поглинання в металах в реальних умовах виробництва залежно від вищезазначених характеристик, необхідно зазначити, що загальна поглинаюча здатність P зразка буде дорівнювати сумі внутрішніх та зовнішніх факторів [9]. Можемо записати

$$P = P_{\text{вн}} + P_{\text{зовн}}, \quad (5)$$

де $P_{\text{вн}}$ – це поглинальна здатність, що визначається власними властивостями металу, $P_{\text{зовн}}$ – це поглинаюча здатність, що визначається зовнішніми умовами і містить різноманітні характеристики від шорсткості поверхні до оксидів, домішок та дефектів.

Велика розбіжність даних щодо поглинання в довідниковій літературі та відмінність між експериментальними даними й теорією головним чином пов'язані з тим, що якість поверхонь зразків, що досліджувались, далека від ідеальної. Отже, загальну поглинальну здатність не можна описати лише власними характеристиками металів, але також повинні, і часто значною мірою, враховуватись властивості стану поверхні. Основними показниками, що становлять науковий інтерес тут, є шорсткість поверхні, дефекти та домішки, а також оксидні шари. Вплив шорсткості поверхні на поглинальну здатність може проявлятися по-різному. Переходячи власне до різання металів сфокусованим лазерним променем високої потужності можна зазначити, що поглинання на ділянках поверхні, де кут падіння випромінювання є перпендикулярним до поверхні, збільшується. Також є великий вплив для збільшення поглинання від канавок, тріщини, нашарувань та сколів, які сприяють поширенню хвилеводів і тому можуть бути багаторазові відбиття вздовж нерівності поверхні. У дослідженнях залежності поглинання від шорсткості було розглянуто режим, коли шорсткість, що характеризується параметром шорсткості δ, дуже мала порівняно з довжиною хвилі лазера, тобто відношення δ/λ набагато менш як 1. Порівняльну оцінку поглинальної здатності поверхні з великою шорсткістю, P_r, у порівнянні з поглинальною здатністю дуже гладкої поверхні того ж матеріалу, $P_{\text{вн}}$, можна отримати за допомогою виразу

$$P_r \approx 1 - (1 - P_{\text{вн}})e^{-(4\pi\delta/\gamma)^2}. \quad (6)$$

Це рівняння було встановлено на основі припущення про гауссівський розподіл висоти шорсткості на поверхні. Дану формулу можна використовувати для загальних функцій розподілу шорсткості [10]. Однак не всі геометрії шорсткості призводять до посилення поглинання. Для перпендикулярно падаючого лазерного променя поглинання поверхні збільшується зі збільшенням шорсткості поверхні. Однак для світла, що падає під кутом, що не є перпендикулярним до поверхні, залежність між поглинанням та шорсткістю поверхні є складнішою. Наприклад, у деяких випадках поглинання може зростати, падати та знову зростати зі збільшенням шорсткості поверхні та зменшенням кута падіння променя.

При різанні металів, коли промінь падає на пласку гладку металеву поверхню під кутом не перпендикулярним до поверхні, він відбивається як звичайне світло з такими ж оптичними властивостями відбиття. Проте лазерний промінь для різання металу сфокусований у вузький пучок високої інтенсивності. Попадання такого променя, навіть віддзеркаленого, на обладнання або людину може завдати великої шкоди. В умовах автоматизованого різання на спеціальних верстатах для збільшення поглинання промінь, що падає на зразок, налаштовують чітко перпендикулярно до поверхні, а також зменшують відстань від головки, звідки виходить промінь до деталі [11]. Однак якщо поверхня деталі шорстка, світло не відбивається від поверхні і повністю поглинається, що збільшує ефективність різання. Це відбувається навіть в умовах, коли промінь падає під кутом не перпендикулярним до поверхні. Якщо поверхня іржава, має тріщини та сколи, це теж сприяє підвищенню поглинання. Лазерне різання металів з блискучою або дзеркальною поверхнею (таких як мідь, латунь, алюміній або нержавіюча сталь) є технологічно складним процесом через високу відбивну здатність цих матеріалів. Зворотне відбиття променя може пошкодити оптичну систему лазера. Для безпечної та якісної обробки використовують оптоволоконні лазери. Їхня довжина хвилі (близько 1,07 мкм) значно краще поглинається металами, ніж у CO_2-лазерів, що мінімізує ризик відбиття та забезпечує стабільне різання. На поверхню металу іноді наносять захисну плівку або спеціальні поглинаючі суміші, які зменшують блиск і допомагають променю «зачепитися» за матеріал на початку процесу. Також іноді використовують азот або кисень, що запобігає окисленню та забезпечує чисту, дзеркальну кромку. Кисень, зазвичай, використовується для товстіших листів (наприклад, міді понад 2 мм), створюючи екзотермічну реакцію, яка прискорює процес. Максимальна товщина різання для кольорових металів зазвичай менша, ніж для сталі. Для алюмінію це товщина до 12-16 мм, для латуні – до 6-10 мм, а для міді – до 4-6 мм (через надвисоку теплопровідність та відбивну здатність). Більшість сучасних верстатів оснащені системами автоматичного захисту від відбитого випромінювання, які миттєво вимикають лазер у разі критичного відбиття променя [12].

Поверхні звичайних металів, знаходячись на повітрі, найчастіше покриваються шаром оксиду, який іноді має багатошарову структуру. Шари оксиду можуть спричинити збільшення поглинальної здатності зразка на порядок. Товщина та структура оксидного шару є основними властивостями, що визначають цю частку у поглинаючу здатність. Ці властивості можуть змінюватися під час лазерної різки через їхню залежність від температури. На ефект поглинання також сильно впливає довжина хвилі променя, що було підтверджено експериментально. Також домішки, що розсіяні на поверхні металу та в ньому, можуть збільшити поглинання випромінювання. Одним із таких прикладів є частинки пилу різного розміру та форми, які можуть призвести до утворення центрів різко підвищеної локальної поглинаючої здатності. Іншим прикладом є абразивні частинки, що за-

лишаються після полірування та іншої механічної обробки, вплив яких у поглинання значною мірою визначається видом цих частинок та їх поглинальними властивостями на відповідній довжині хвилі лазера. Таким чином, для зменшення або усунення впливу такого поглинання шляхом видалення таких частинок, полірувальні матеріали повинні бути прозорими для відповідної довжини хвилі. Крім домішок, також можемо мати додаткове поглинання через дефекти, що виникають в основній масі металу, такі як пори, а також вкраплення інших хімічних елементів.

Висновки. Глибоке знання та розуміння фундаментальних механізмів поглинання, що лежать в основі будь-якої обробки матеріалів лазерами, безумовно, має велике значення для майбутнього розвитку цієї технології. У цій статті розглянуто результати деяких важливих спостережень та досліджень й пояснюється залежність поглинаючої здатності металу від різних властивостей лазера та матеріалу, таких, як: довжина хвилі, кут падіння, шорсткість поверхні, оксиди, дефекти та домішки. Багато зовнішніх властивостей металу, що оброблюється, впливають на поглинаючу здатність, серед яких оксидні шари та шорсткість поверхні є, мабуть, найважливішими, і для яких існують теоретичні моделі. Поглинаюча здатність залежить від геометрії шорсткості та, в більшості випадків, посилюється при збільшенні шорсткості поверхні. Є моделі як для малої, так і для великої шорсткості. Поглинальна здатність посилюється і в оксидних шарах через інтерференційні ефекти та сильно залежить від товщини оксидного шару, структури та довжини хвилі лазера. У роботі було зазначено про вплив дефектів домішок, а також об'ємних властивостей, таких як пори, тріщини та канавки, які можуть призвести до локальних змін поглинання. Незважаючи на те, що є багато експериментальних результатів для чистих металів за кімнатної температури, потрібно більше даних для оцінки моделі за підвищених температур та для негладких і нечистих поверхонь.

Список використаних джерел

1. Пупань, Л. І. (2020). *Лазерні технології у машинобудуванні: навчальний посібник для студентів спеціальності «Прикладна механіка» денної, заочної та дистанційної форм навчання*. НТУ «ХПІ».

2. Бобицький, Я. В., & Матвіїшин, Г. Л. (2015). *Лазерні технології. Частина 1: навчальний посібник*. Видавництво Львівської політехніки.

3. Готра, З. Ю., & Бобицький, Я. В. (1991). *Лазерні методи обробки в мікроелектроніці*. Світ.

4. Тимчик, Г. С., & Філіппова, М. В. (уклад.). (2018). *Лазерні технології: лабораторний практикум*: навчальний посібник для студентів спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка». КПІ ім. Ігоря Сікорського.

5. Бобицький, Я. В., & Матвіїшин, Г. Л. (2015). *Лазерні технології. Частина 2: навчальний посібник*. Видавництво Львівської політехніки.

6. Bergström, D., & Kaplan, A. (2003). Mathematical modelling of laser absorption mechanisms in metals: A review. In *Proceedings of the 16th Meeting on Mathematical Modelling of Materials Processing with Lasers (M4PL16)*. Igls, Austria.

7. Guarino, S., Ponticelli, G. S., & Venettacci, S. (2020). Environmental assessment of Selective Laser Melting compared with Laser Cutting of 316L stainless steel: A case study for flat washers' production. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, *31*, 525–538. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.08.004.

8. Tang, K., Kawka, P., & Buckius, R. (1999). Geometric optics applied to rough surfaces coated with an absorbing thin film. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 13*(2), 169–176.

9. Schott, P., de Beaucoudrey, N., & Bourlier, C. (2003). Reflectivity of one-dimensional rough surfaces using the ray tracing technique with multiple reflections. In *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* (Vol. 7, pp. 4214–4216).

10. Rodrigues, G. C., Vorkov, V., & Duflou, J. R. (2018). Optimal laser beam configurations for laser cutting of metal sheets. *Procedia CIRP, 74*, 714-718. https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.026.

11. Seon, S., Shin, J. S., Oh, S. Y., Park, H., Chung, C.-M., Kim, T.-S., Lee, L., & Lee, J. (2018). Improvement of cutting performance for thick stainless steel plates by step-like cutting speed increase in high-power fiber laser cutting. *Optics & Laser Technology, 103*, 311–317. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.01.054.

12. Celli, V., Maradudin, A., Marvin, A., & McGurn, A. (1985). Some aspects of light scattering from randomly rough metal surfaces. *Journal of the Optical Society of America A, 2*(12), 2225–2239.

References

1. Pupan, L. I. (2020). *Lazerni tekhnolohii u mashynobuduvanni: navch. posibnyk dlia studentiv spetsialnosti «Prykladna mekhanika» dennoi, zaochnoi ta dystantsiinoi form navchannia [Laser technologies in mechanical engineering: study guide for students of the specialty "Applied Mechanics" of full-time, part-time and distance learning]*. NTU «KhPI».

2. Bobytskyi, Ya. V., & Matviishyn, H. L. (2015). *Lazerni tekhnolohii. Chastyna 1: navchalnyi posibnyk [Laser technologies. Part 1: Study guide]*. Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniky.

3. Hotra, Z. Yu., & Bobytskyi, Ya. V. (1991). *Lazerni metody obrobky v mikroelektronitsi [Laser processing methods in microelectronics]*. Svit.

4. Tymchyk, H. S., & Filippova, M. V. (Compilers). (2018). *Lazerni tekhnolohii. Laboratornyi praktykum: navch. posib. dlia stud. spetsialnostei 151 «Avtomatyzatsiia ta kompiuterno-intehrovani tekhnolohii», 152 «Metrolohiia ta informatsiino-vymiriuvalna tekhnika» [Laser technologies. Laboratory workshop: Study guide for students of specialties 151 "Automation and computer-integrated technologies", 152 "Metrology and information-measuring technology"]*. KPI im. Ihoria Sikorskoho.

5. Bobytskyi, Ya. V., & Matviishyn, H. L. (2015). *Lazerni tekhnolohii. Chastyna 2: navchalnyi posibnyk [Laser technologies. Part 2: Study guide]*. Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniky.

6. Bergstrom, D., & Kaplan, A. (2003). Mathematical modelling of laser absorption mechanisms in metals: A review. *Proceedings of the 16th Meeting on Mathematical Modelling of Materials Processing with Lasers (M4PL16)*, Igls, Austria, January 20–24.

7. Guarino, S., Ponticelli, G. S., & Venettacci, S. (2020). Environmental assessment of selective laser melting compared with laser cutting of 316L stainless steel: A case study for flat washers' production. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 31*, 525–538. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.08.004.

8. Tang, K., Kawka, P., & Buckius, R. (1999). Geometric optics applied to rough surfaces coated with an absorbing thin film. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 13*, 169–176.

9. Schott, P., de Beaucoudrey, N., & Bourlier, C. (2003). Reflectivity of one-dimensional rough surfaces using the ray tracing technique with multiple reflections. *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 4214–4216.

10. Rodrigues, G. C., Vorkov, V., & Duflou, J. R. (2018). Optimal laser beam configurations for laser cutting of metal sheets. *Procedia CIRP, 74*, 714–718. https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.026.

11. Seon, S., Shin, J. S., Oh, S. Y., Park, H., Chung, C.-M., Kim, T.-S., Lee, L., & Lee, J. (2018). Improvement of cutting performance for thick stainless steel plates by step-like cutting speed increase in high-power fiber laser cutting. *Optics & Laser Technology, 103*, 311–317. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.01.054.

12. Celli, V., Maradudin, A., Marvin, A., & McGurn, A. (1985). Some aspects of light scattering from randomly rough metal surfaces. *Journal of the Optical Society of America A, 2*, 2225–2239.

Дата першого надходження статті до видання: 22.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 14.01.2026

UDC 621.375.826:621

Ihor Shaposhnyk
Senior Research official
Ukrainian Research Institute of Special Equipment and Forensic Science of Security Service of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
E-mail: shaposhnyk.ihor@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0001-9915-2674

THE INFLUENCE OF METALS' SURFACE PROPERTIES ON THEIR LASER CUTTING

The use of laser technology is currently one of the most progressive areas in industry, which has undergone significant development in recent years. The use of laser radiation is an effective process for processing various materials. Laser technologies differ from traditional processing methods in the absence of contact phenomena in the processing zone and the possibility of dosed intensive energy supply to the surface of the product; the locality of physical processes in the heat-affected zone and the absence of significant deformations of the processed parts; the possibility of processing almost any materials, regardless of their mechanical properties, with high quality and productivity. This technology has a high level of efficiency, as well as environmental friendliness. In some cases, laser technology is the only one for solving important technological problems [1, p. 5]. In laser processing of metals, understanding the fundamental principles of surface absorption of light from a laser beam plays an important role in determining the optimal parameters and processing conditions. The absorption of light from a laser beam depends on a number of different parameters. These include laser parameters such as intensity, wavelength, polarization and angle of incidence, and, it is worth noting, material parameters such as chemical composition, temperature, roughness, oxide layers and surface contamination. Extensive theoretical and experimental data on light absorption by various materials with clean, smooth, contamination-free surfaces contrast with relatively limited information on metals and alloys used in real production conditions [4, p. 28]. This paper focuses on the problem and proposes preliminary directions for research into the conditions of laser beam absorption in metals and alloys of various types of roughness, with contaminants and oxides on the surface. The above-mentioned conditions of laser beam absorption and reflection from various types of surfaces are extremely important in manual laser processing of metals and alloys, especially in cutting, when the beam is focused into a narrow beam at high power and frequency. When manually cutting metals with low roughness, it is difficult to maintain the angle of inclination of the tool relative to the surface, so the reflection of the beam from it can cause damage to both the operator and the equipment. Considering these factors, the study of such conditions for the surface treatment of metals and alloys is particularly important.

Key words: *laser technologies; laser cutting; manual laser cutting; laser beam absorption; laser beam reflection; surface roughness during laser cutting; laser tool tilt angle.*

Fig.: 1. References: 12.

Шапошник І. А. Вплив властивостей поверхонь металів на їх лазерне різання. *Технічні науки та технології*, 2026. № 1(43). С. 69-78. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-69-78.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-79-89
УДК 621.891

Олександр Дмитрович Петров[1], Євген Валентинович Корбут[2]

[1]аспірант кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України «КПІ» ім. Ігоря Сікорського (Київ, Україна)
E-mail: petrovsasha69@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0003-9995-2246

[2]кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України «КПІ» ім. Ігоря Сікорського (Київ, Україна)
E-mail: korbut1@i.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-1221-4052

ВИБІР СКЛАДУ ТА ТОПОГРАФІЇ МОДИФІКОВАНОГО ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ІНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ

У роботі розглянуто питання підвищення працездатності різального інструмента (РІ) для обробки полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) за рахунок використання зносостійких покриттів дискретного типу, які нанесено на робочі поверхні інструмента зі швидкорізальної сталі (ШР). У результаті аналізу розрахунків напружено-деформованого стану визначено склад та топографію покриттів, які можуть бути рекомендовані для використання під час різання полімерних композиційних матеріалів. Наведено методи експериментального визначення залишкових напружень та чисельний розрахунок розмірів дискретних ділянок, які було промодельовано для оцінки механічної поведінки покриттів.

Ключові слова: *композитні полімерні матеріали (ПКМ); різальний інструмент (РІ); процес різання; покриття дискретного типу; залишкові напруження; когезійна міцність.*

Рис.: 3. Табл.: 4. Бібл.: 14.

Актуальність теми дослідження. Зростання частки використання полімерних композиційних матеріалів, зокрема вуглепластику, в різних сферах промисловості, а також анізотропний характер їхніх властивостей вимагають застосування різального інструменту з підвищеною зносостійкістю, теплостійкістю, теплопровідністю та низьким коефіцієнтом тертя для забезпечення належної якості механічної обробки. Проблема підвищення ефективності та якості обробки полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) різанням значною мірою пов'язана з пошуком шляхів забезпечення працездатності та надійності інструменту, що використовується для їх обробки.

Для зменшення негативних наслідків вказаних проблем розглядається зміцнення робочих поверхонь методом нанесення захисного покриття дискретного типу. Фізико-механічні властивості інструментальних матеріалів підвищують за допомогою захисних покриттів, що своєю чергою зменшує потребу в дорогих сплавах та значно покращує експлуатаційні показники деталей машин і різального інструменту [1]. Питання щодо використання зносостійких покриттів на різальному інструменті досить широко розглянуто для процесу різання традиційних матеріалів – металів, але для обробки полімерних композитів дослідження проводилися недостатньою мірою і потребують подальших досліджень.

Постановка проблеми. Одним із ключових аспектів у підвищенні ефективності та якості механічної обробки ПКМ є пошук технологічних рішень, щодо методів підвищення працездатності, високої надійності та стабільної роботи різального інструменту. У зв'язку з тим, що фізико-механічні властивості ПКМ відмінні від властивостей металів, то це накладає ряд вимог як для конструкції різального інструмента, так і для інструментального матеріалу. Підвищення вимог до експлуатаційних характеристик інструментів, призначених для обробки полімерних композиційних матеріалів (ПКМ), зумовлює необхідність удосконалення інструментальних матеріалів або створення нових їх видів[1; 3]. Проте в багатьох випадках така стратегія є економічно необґрунтованою. У зв’язку з цим перспективним напрямом розвитку різального інструменту для обробки ПКМ стає впровадженням методів модифікації поверхневого шару[2; 3], що дозволяє замінити традиційне покращення об’ємних властивостей матеріалу на локальну обробку робочої поверхні.

© О. Д. Петров, Є. В. Корбут, 2026

Аналіз останніх досліджень та публікацій. З метою підвищення зносостійких властивостей інструментів зі швидкорізальних та твердосплавних матеріалів активно використовуються покриття на основі карбіду та нітриду титану (TiC, TiN), а також їхніх складних сполук (TiAlN, TiCN). У сучасних умовах дедалі ширше впроваджуються покриття CrN і ZrN, які забезпечують підвищення працездатності інструменту при механічній обробці [1; 3]. Хоча покриття даного складу відповідають вимогам для інструментів для обробки ПКМ – теплопровідність, зносостійкість та інші, проте, як зазначалось в дослідженнях при використанні таких покриттів у процесі різання під дією силового та температурного навантаження можливо виникнення когезійного розтріскування [1; 4].

Топографія модифікованого шару різального інструменту являє собою складний мікрорельєф, що формується функціональними покриттями (наприклад, PVD/CVD), для зниження тертя та зносу. Топографія модифікованого шару різального інструменту визначає умови контактної взаємодії на його поверхнях і безпосередньо впливає на зносостійкість, тепловий стан та загальну працездатність інструменту. Модифікація поверхні (нанесення покриттів або структурування) спрямована на створення такої топографії, яка забезпечує високий рівень надійності за рахунок зниження тертя.

Ключові аспекти топографії:

– функціональні покриття застосовуються для підвищення стійкості інструментів, що визначають верхній шар твердими або багатошаровими матеріалами.

– характеристики поверхні включають геометричні параметри, що визначають адгезію зносостійкість та теплофізичні властивості (наприклад, глобулярна структура підвищує міцність).

– вплив на знос через оптимізацію топографії передньої та задньої поверхонь (наприклад створення наноструктур) дозволяє знизити інтенсивність зносу та тертя.

– типи рельєфу включають мікрокишені для мастильно-охолоджувальної рідини (СОЖ) та стружколамні канавки.

Модифікація шарів включаючи методи PVD і CVD дозволяє створювати покриття з високою твердістю і специфічним мікрорельєфом, що критично важливо для продуктивності інструменту. Для детального аналізу стану модифікованої поверхні використовують групу параметрів, які дають інформацію про функціональні характеристики: середня арифметична висота: загальна шорсткість модифікованого шару; висота ядра: характеризує здатність поверхні утримувати мастило; зведена висота піків: пов'язана з несучою здатністю та зносостійкістю; низькі значення сприяють скороченню фази припрацювання; зведена глибина западин: також впливає на утримання змащувальних речовин у зоні різання; асиметрія та ексцес: використовуються для аналізу розподілу нерівностей після обробки.

Топографія задньої поверхні інструменту критично впливає на розвиток зносу, який виникає через тертя та хімічну реакцію між стружкою та інструментом. Поліпшення топографії задньої поверхні (наприклад, через шліфування та полірування перед нанесенням покриття) знижує інтенсивність утворення кратерів і зменшує схильність до адгезії (переносу матеріалу заготовки на інструмент). Багатошарові покриття (TiN, TiCN, TiAlN), отримані методами PVD або CVD, змінюють мікротопографію, створюючи бар'єр для дифузії та підвищуючи твердість. Початкове перенесення та нарощування шарів матеріалу заготовки локалізується на мікроскопічних нерівностях топографії задньої поверхні інструменту. PVD та CVD: Нанесення тонких плівок (наприклад, TiN товщиною близько 3 мкм) для покращення трибологічних властивостей. Навмисне створення мікрорельєфу на задній поверхні для поліпшення трибологічних явищ на межі контакту інструменту та стружки. Магнітно-абразивна обробка використовується для формування оптимальної топографії, що забезпечує довговічність інструменту.

Підвищення когезійної та контактної міцності модифікованого шару напряму пов'язано з формуванням системи з мінімальним рівнем НДС [8]. Для практичної реалізації цього підходу сформований загальний принцип – створення модифікованого поверхневого шару з підвищеною когезійною міцністю за рахунок заміни традиційного суцільного покриття на шар з дискретною будовою, що обумовлює обмеження рівня максимальних напружень як в самому модифікованому шарі, так і у площині контакту «основа-модифікований поверхневий шар». Вид руйнування в системі „основа-покриття" залежить від величини та знаку залишкових напружень [7; 10]. В умовах дії залишкових напружень розтягу ще до початку експлуатації виробу може початися розтріскування покриття, якщо величина залишкових напружень розтягу $\sigma_n^{зал}$ більше, ніж границя міцності під час розтягування матеріалу покриття. У PVD-покриттях структурні напруження зумовлені дефектами, що виникають під час конденсації, які тісно пов'язані з мікроструктурою покриття [3; 8]. Дефекти залежать від режимів осадження та від часу нанесення, який визначає товщину покриття. Температурна компонента напружень формується внаслідок різниці теплових коефіцієнтів розширення покриття і підкладки. Значний рівень залишкових стискаючих напружень сприяє підвищенню тріщиностійкості поверхні.

Залишкові напруження в покриттях[5; 6; 8] формуються внаслідок декількох факторів, таких як різниця коефіцієнтів теплового розширення основи й покриття, присутність захоплених атомів газу, а також дефектність конденсату. Термічна складова виникає через неоднакову деформацію матеріалів при охолодженні від температури нанесення до кімнатної, що спричинює появу залишкових напружень. Структурні напруження пов'язані з дефектністю конденсату та процесом росту покриття. Дослідження [8; 9; 10] показують, що напруження зростання в покриттях, які належать до структурної компоненти, не залежать від матеріалу основи, на відміну від термічних напружень. При цьому згідно з джерелом [10] відомо, що ці напруження зменшуються зі збільшенням товщини покриття.

Для запобігання когезійного розтріскування покриття професором Б. А. Ляшенко було запропоновано замість суцільного покриття використовувати дискретне. Покриття дискретного типу [5; 6] застосовуються для підвищення зносостійкості деталей із поверхнями складної форми. Відповідно до принципу Шарпі, на поверхнях формують регулярні ділянки з компактним розміщенням більш твердого матеріалу порівняно з основою, з чітко визначеним рельєфом, геометричні параметри якого можуть варіюватися в різних діапазонах. Для деталей, що експлуатуються у складних умовах, рекомендовано використовувати захисні покриття дискретного типу та розробляти на їхній основі композиційні структури з мінімальним зносом [2; 3; 7].

Мета і задачі дослідження. Мета полягає у підвищенні працездатності інструменту для обробки ПКМ шляхом формування на його робочих поверхнях дискретного покриття[3]. Для вирішення питання підвищення працездатності інструмента для обробки ПКМ необхідно вирішити такі задачі:

– визначити оптимальне за складом захисне зносостійке покриття, яке відповідає критеріям, зазначеним вище, що дозволить забезпечити якість обробки;

– визначити напружено-деформований стан дискретного покриття після його нанесення на різальний інструмент;

– на основі визначеного НДС [8] покриття і за умов забезпечення когезійної міцності покриття розробити конструктивні схеми модифікованого поверхневого шару різального інструмента для обробки ПКМ.

Матеріали та методи дослідження. Як відомо[11; 12], тверді тонкі вакуумно-плазмові покриття характеризуються наявністю значних залишкових напружень, які формуються ще на етапі їхнього осадження. Це зумовлює те, що навіть у відсутність зовнішнього навантаження покриття разом із приповерхневими шарами основи перебувають у

напружено-деформованому стані. Такий стан спричинений невідповідністю властивостей між матеріалом покриття та основою. У літературі [11; 12] розрізняють два основних механізми формування залишкових напружень: структурний та температурний. Структурні напруження виникають унаслідок дефектів, які формуються під час конденсації матеріалу покриття, та залежать від мікроструктурних характеристик, умов осадження і товщини покриття [11; 12]. Температурний механізм, у свою чергу, пов'язаний із відмінністю коефіцієнтів теплового розширення покриття й основи, що призводить до термічних напружень після охолодження. Зазвичай для PVD-покриттів характерні залишкові напруження стискального характеру, які, залежно від товщини шару та фізико-механічних властивостей основи, можуть змінюватися до слабких розтягувальних. Наявність стискальних залишкових напружень сприяє підвищенню тріщиностійкості та зносостійкості модифікованих поверхонь, а також позитивно впливає на показники витривалості й межі плинності. Водночас надмірні напруження стиску можуть знижувати механічну надійність покриття — підвищується його крихкість, зростає ризик самовільного відшарування або порушення адгезії до основи як до початку експлуатації, так і в процесі роботи виробу. Оптимальний склад покриття для різального інструменту не визначається одним універсальним параметром. Це завжди компроміс між характеристиками матеріалу інструмента, властивостями заготовки та умовами виконання процесу різання. Головним показником правильного вибору є досягнення максимальної стійкості інструмента при збереженні необхідної якості обробки. Нижче подано основні технічні критерії, за якими формують склад покриттів:

– теплостійкість і термічна стабільність, один із визначальних чинників для обробки ПКМ.

– твердість і зносостійкість характеризує здатність покриття протидіяти абразивному зношуванню, покриття має бути суттєво твердішим за матеріал, що обробляється.

– коефіцієнт тертя (трибологічні властивості) важливий аспект для запобігання та мінімізація тертя між оброблюваним матеріалом та задньою поверхнею інструмента.

– адгезійна міцність показує здатність покриття надійно утримуватися на основі (субстраті). Оскільки навіть оптимальний за складом шар буде неефективним, якщо він відшаровується під навантаженням.

– хімічна інертність забезпечує відсутність небажаних хімічних взаємодій між інструментом і деталлю, впливає на мінімізацію дифузії та взаємного розчинення матеріалів за високих температур.

Для досліджень були вибрані такі за складом матеріали покриття TiN, TiAlN, CrN та ZrN, які рекомендовані та використовуються для суцільних покриттів, нанесених на різальний інструмент для обробки ПКМ. Товщина покриття – 3, 7, 10мкм, що співвідноситься з товщиною армуючих волокон ПКМ. Матеріал основи – швидкорізальна сталь Р6М5.

Фізико-механічні властивості даних за складом покриттів представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Фізико-механічні характеристики матеріалів покриттів

№ з/п	Покриття	Модуль пружності Е, ГПа	Твердість, ГПА	Коефіцієнт тертя	Коефіцієнт Пуасона, μ	Коефіцієнт теплового розширення λ, 10^{-6} K^{-1}
1	TiN	256	20,5	0,55	0,25	9,35
2	TiAlN	342	32,0	0,5	0,3	8,0
3	CrN	320	20,0	0,5	0,28	7,5
4	ZrN	425	22,0	0,4	0,26	7,2

Під дією нормальних напружень, що виникають у покритті через зовнішнє навантаження та нагрівання інструменту, а також залишкових напружень, зумовлених різницею коефіцієнтів лінійного теплового розширення матеріалів покриття та основи [3], а також через наявність дефектів у покритті, можливе руйнування зносостійкого шару внаслідок

когезійного розтріскування [3; 8; 11]. Дискретна будова модифікованого поверхневого шару під час розтягу визначається величиною кроку регулярних тріщин [2; 6; 8]. Визначення критичного кроку дозволяє встановити оптимальні конструктивні параметри дискретного покриття. Утворення тріщини r є наслідком «недовантаження» ділянок покриття, прилеглих до тріщини, тобто зниження $\sigma_п$ до нуля на кромці покриття в зоні тріщини. Процес утворення тріщин підпорядковується нормальному закону розподілу [7]. Визначивши параметр r, можна прогнозувати відстань між дискретними ділянками залежно від складу та структури покриття.

Згідно з дослідженням напруження в покритті $\sigma_п^{еф}$ по його довжині, розраховуються за залежністю [8]:

$$\sigma_п^{еф} = \sigma_п^{екс} + \sigma_п^{зал} \quad (1)$$

де $\sigma_п^{екс} = \sigma_п^{M} + \sigma_п^{T}$ – напруження, які формуються в покритті внаслідок впливу зовнішніх сил; $\sigma_п^{M}$ - напруження, що виникають у покритті під впливом механічного навантаження; $\sigma_п^{T}$ – напруження, зумовлені неоднорідним температурним розподілом у покритті; $\sigma_п^{зал}$ – залишкові напруження у покритті.

Згідно з рівністю (1), зниження залишкових напружень у системі «основа–покриття» $\sigma_п^{зал}$ дає змогу підвищити рівень напружень від механічного навантаження $\sigma_п^{M}$, тим самим підвищуючи ефективність роботи інструмента з модифікованим шаром. Під час експлуатації різального інструменту, окрім механічних напружень, можуть з'являтися також напруження, спричинені температурними впливами в зоні різання. Однак, оскільки однією з основних вимог при обробці полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) є підтримка температури в зоні різання нижче температури деструкції матеріалу (350 °С), теплові напруження $\sigma_п^{T}$ у даному дослідженні не враховувалися.

Напруження від дії механічного навантаження визначаємо за формулою [4]:

$$\sigma_п^{M} = \frac{1}{h_п} \cdot \frac{\varepsilon_{кр}}{\left(\frac{1}{E_п h_п} + \frac{1}{E_o H_o}\right)} \cdot \left[1 - \frac{ch(ky)}{ch(kl)}\right], \quad (2)$$

де $\varepsilon_{кр}$ – критична деформація основи, за перевищенням якої починається когезійне розтріскування; H_o - товщина основи; $h_п$ – товщина покриття; E_o, $E_п$ – модулі пружності основи і покриття; y – проміжна координата, $2l$ – базовий розмір; k -коефіцієнт, який залежить від модулів пружності основи і покриття:

$$k^2 = 2\frac{G_o G_п}{G_o h_п + G_п H_o}\left(\frac{1}{E_п h_п} + \frac{1}{E_o H_o}\right), \quad (3)$$

де $G_п$, G_o – Параметри модулів зсуву основи і покриття.

Для визначення залишкових напружень, що виникають у процесі формування покриття і впливають на напружений стан системи «покриття-основа», було застосовано метод, описаний у роботі [10] – метод гнучкого зразка, заснований на тому, що під впливом залишкових напружень у покритті довга, вузька і тонка пластинка, покрита суцільним шаром, деформується у вигляді дуги кола. Для такої деформованої пластинки вимірюють прогин або визначають радіус кривизни, а потім за відповідними формулами розраховують залишкові напруження [4, 5]. Для визначення залишкових напружень у покриттях на пластинки розміром 200×15×0,5 мм зі швидкорізальної сталі Р6М5 ($E_п$ = 2,3×10^5 МПа) наносили покриття TiN[8; 10]. Після чого визначали радіус прогину зразка, який виникав внаслідок наявності залишкових напружень розтягу (рис. 1).

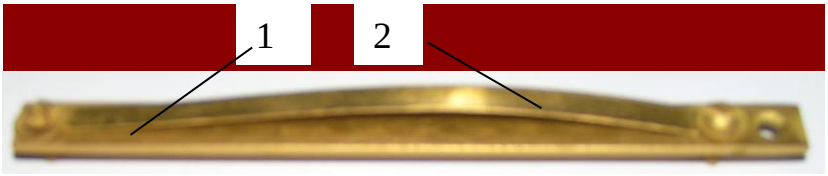


Рис. 1 Кондуктор (1) зі зразком (2) після нанесення покриття [10]

Відбулося деформування у вигляді дуги, внаслідок дії залишкових напружень. Для визначення залишкових напружень виміряли величину прогину *f* дуги зразка (рис. 2).

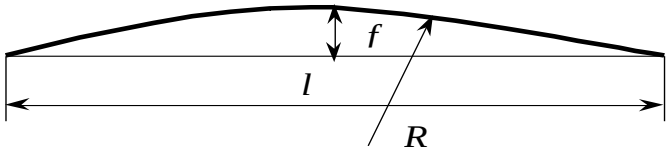


Рис. 2. Схема вимірювання кривизни R зразка [4]:
l хорда сегмента; f – стріла сегмента

Радіус кривизни *R* розраховували через прогин *f* і хорду *l* за залежністю

$$R = \frac{l^2 + 4f^2}{8f}. \tag{4}$$

Проведено аналіз робіт [4; 8; 10; 12] та визначено формули для розрахунку залишкових напружень для системи “покриття-основа”.

$$\sigma_n^{зал} = \frac{32E_o H_o^3 f}{3a^2 h_n \left(1-\nu_o\right)\left(2H_o + h_n\right)}, \tag{5}$$

де $2H_o$, h_n – товщини основи і покриття, відповідно;

E_o, ν_o – модуль пружності основи першого роду і коефіцієнт Пуасона матеріалу основи, відповідно; *f* – прогин зразка; *a* – довжина зразка.

З використанням методу розрахунку тонких пластин на вигин можна визначити $\sigma_n^{зал}$ наступним чином:

$$\sigma_n^{зал} = \frac{4E_o H_o^3}{3Rh_n \left(1-\nu_o^2\right)\left(2H_o + h_n\right)}, \tag{6}$$

де *R* – радіус кривизни, що спричиняється залишковими напруженнями.

Для покриття малої товщини $h << H$, формулу (6) можна записати у вигляді [10]:

$$\sigma_n^{зал} = \frac{16E_o H_o^2 f}{3a^2 h_n \left(1-\nu_o\right)}, \tag{7}$$

а для лінійного напруженого стану:

$$\sigma_n^{зал} = \frac{16E_o H_o^2 f}{3a^2 h_n}. \tag{8}$$

Оскільки ми маємо лінійно напружений стан при $h<<H$, залежність (6) перетворюється на відому формулу Стонея:

$$\sigma_n^{зал} = \frac{2E_o H_o^2}{3Rh_n}. \tag{9}$$

Результати розрахунку залишкових напружень для покриття нанесеного на швидкорізальну сталь Р6М5 оформлені у вигляді таблиці 2 та графіку (рис. 3).

Таблиця 2 – Залишкові напруження в системі «основа-покриття» залежно від складу товщини покриття

№ з/п	Покриття	Товщина покриття, мкм	Напруження $\sigma_{п}^{зал}$, МПа
1.	TiN	3	-683,3
		7	-545,3
		10	-320,2
2.	TiAlN	3	-720,4
		7	-580,6
		10	-353,8
3.	CrN	3	-735,2
		7	-599,9
		10	-432,8
4.	ZrN	3	-760,0
		7	-631,2
		10	-476,1

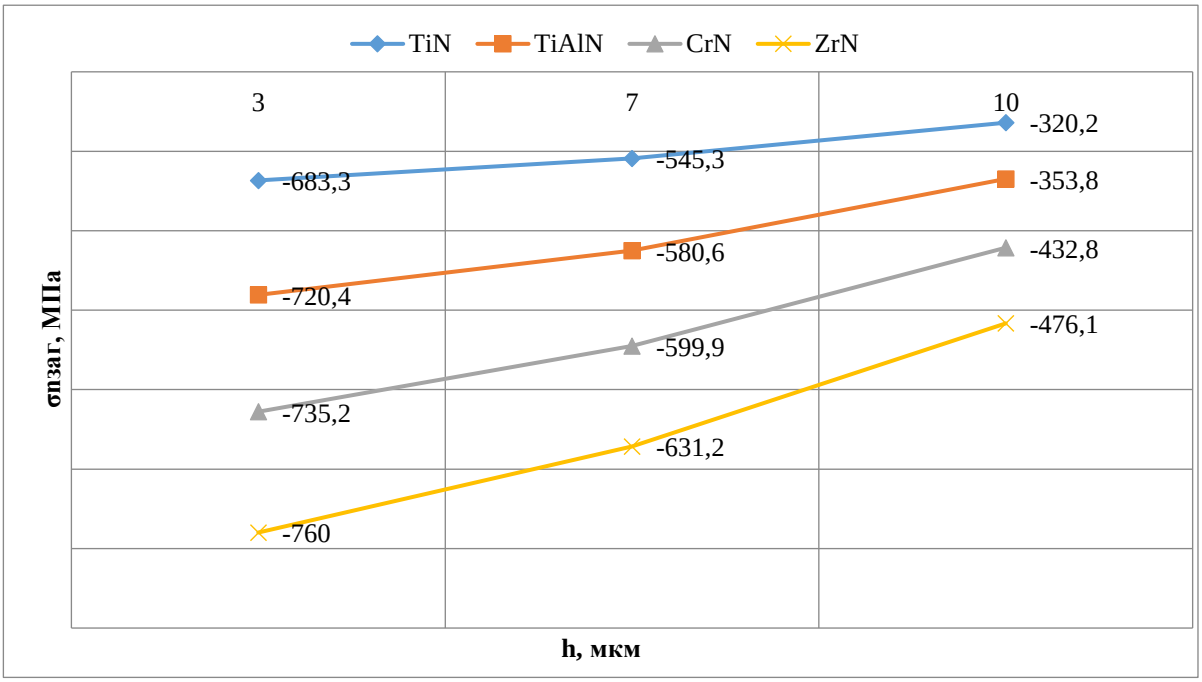


Рис. 3. Графік залежності залишкових напружень від складу та товщини покриття

Вирішальним знаком напружень для вибору матеріалу покриття ріжучого інструменту є стискаючі напруження. Стискаючі напруження є вирішальними, оскільки покриття з їх високим рівнем (особливо сформовані методом PVD) перешкоджають утворенню та розвитку тріщин, що підвищує довговічність інструмента і зміцнює різальну кромку.

Стискаючі напруження запобігають руйнуванню, оскільки вони виконують роль своєрідного «буфера» проти розтягувальних навантажень, що виникають у процесі різання, тим самим знижуючи ймовірність крихкого руйнування матеріалу. Завдяки наявності стискаючих напружень покриття ефективніше протистоїть відшаруванню і зменшує схильність до сколів та зношування. На відміну від цього, розтягувальні напруження є небажаними, оскільки вони сприяють виникненню тріщин у покритті, які згодом можуть поширюватися на основу інструмента. Попри те, що для покриттів визначальною є висока

твердість, саме внутрішні стискаючі напруження гарантують стабільну й надійну роботу інструмента в умовах значних механічних і термічних навантажень.

Більшість сучасних інструментальних покриттів, зокрема TiN, TiAlN і Al_2O_3, нанесених методами PVD (фізичне осадження з парової фази) або модифікованими технологіями CVD (хімічне осадження з парової фази), характеризуються значними внутрішніми залишковими стискаючими напруженнями. Це розглядається як позитивна характеристика, оскільки:

– Гальмування розвитку тріщин: стискаючі напруження ущільнюють поверхневий шар, ускладнюючи зародження та поширення мікротріщин.

– Зростання міцності: вони частково нейтралізують розтягувальні напруження, що виникають під час різання, тим самим зменшуючи ризик крихкого руйнування керамічного шару.

Розтягувальні напруження здебільшого небажані для покриттів, оскільки: вони прискорюють розкриття та ріст тріщин; спричиняють адгезійне руйнування і відшарування покриття від основи; часто виникають під час традиційного CVD-процесу через різницю коефіцієнтів термічного розширення матеріалу інструмента і покриття, що потребує додаткової обробки (наприклад, дробоструминного зміцнення) для формування стискаючого стану.

Таблиця 3 – Порівняння впливу напружень

Тип напруження	*Вплив на інструмент*	*Результат*
Стискаючі	Закривають мікротріщини, зміцнюють поверхневий шар	Підвищення стійкості та втомної міцності
Розтягуючі	Сприяють росту тріщин і відшаруванню	Прискорене руйнування, поява сколів

З розрахунків можна зробити висновки, що найменше значення залишкових напружень покриття нанесеного на швидкорізальну сталь Р6М5 має покриття зі складом TiN та збільшення товщини покриття призводить до зменшення залишкових напружень. Тому подальші дослідження з формування архітектури покриття проводимо з покриття складом TiN. Для встановлення розмірів дискретних ділянок D, стійких до когезійного розтріскування, з урахуванням критичної деформації підкладки та залишкових напружень у покритті, але без врахування експлуатаційних термонапружень, був проведений розрахунок максимально допустимого кроку тріщин – C_n. Приймаємо, що когезійна міцність покриття $\sigma^{ког} = \varepsilon_{kp} E_n$ в ньому розподілена за нормальним законом з стандартним відхиленням $0{,}1\sigma^{ког}$, то найбільш ймовірно тріщина може виникнути в перетині (l-y) при $\sigma_n^{еф} = 0{,}9\sigma^{ког}$ [3; 4; 8; 10; 14].

Максимально допустимий інтервал між тріщинами в суцільному покритті:

$$C_n = -\frac{1}{k} ln\left(0{,}1 + \frac{\sigma_n^T + \sigma_n^{зал}}{\varepsilon_{kp} E_n} \cdot \left(1 + \frac{E_n h_n}{E_o H_o}\right)\right). \quad (10)$$

Максимальний приведений розмір ділянки дискретного покриття:

$$D_{\max} \le C_n \quad (11)$$

Оскільки в зоні різання ПКМ температура не повинна перевищувати 350 °С, залежність (10) можна записати у вигляді (12):

$$C_n = -\frac{1}{k} \ln\left(0{,}1 + \frac{\sigma_n^{зал}}{\varepsilon_{kp} E_n} \cdot \left(1 + \frac{E_n h_n}{E_o H_o}\right)\right). \quad (12)$$

Розрахункові значення кроку тріщин «C_n» залежно від товщини покриття наведені в табл. 4 та представлені на рис. 4.

Таблиця 4 – Залежність максимального кроку тріщин від товщини покриття.

Товщина покриття, мкм	C_n, мм
3	0,65
7	0,55
10	0,41

Таким чином, визначивши максимально допустимий крок тріщин у суцільному покритті, можна задати розміри дискретних ділянок покриття та відстань між ними з урахуванням експлуатаційних, залишкових та температурних напружень на етапі проєктування різального інструменту з покриттям. Це дозволить запобігти когезійному розтріскуванню покриття. При формуванні поверхневих структур підвищеної стійкості використовували правило Г. Шарпі, згідно з яким для забезпечення високої несучої здатності шар робочої поверхні повинен мати пластичну основу з твердими включеннями [9;10; 11;12]. Оцінювання напруженого стану зносостійких покриттів різального інструменту базується на аналізі величини та розподілу залишкових напруг по глибині шару. У PVD-покриттях стискаючі напруження вважаються сприятливими, оскільки стримують розвиток тріщин і підвищують довговічність інструменту, тоді як розтягуючі можуть спричиняти руйнування. Для визначення запасу міцності розраховують еквівалентну напругу за відповідними теоріями міцності. Важливим є також урахування градієнта напруги по товщині покриття та стану на межі розділу з основою, оскільки значний перепад напруг знижує адгезію і може вимагати застосування перехідних шарів. У багатошарових покриттях необхідно враховувати термічні залишкові напруги, які здатні викликати відшаровування. Порушення критеріїв міцності призводить до когезійного руйнування, делямінації та утворення тріщин.

Висновки. При виборі або розробці покриття прагнуть досягти саме залишкових стискаючих напружень, оскільки вони значно підвищують експлуатаційний ресурс інструмента, особливо в умовах переривчастого різання та ударних навантажень. Застосування запропонованого підходу забезпечує підвищення зносостійкості ріжучого інструменту, за рахунок формування на робочій поверхні інструменту зон з підвищеною міцністю, що дозволяє збільшити їхню працездатність у середньому на 30–50 %. Конструкція покриття була визначена розрахунковим методом на основі моделі напружено-деформованого стану. Цей підхід слугував базою для моделювання технології формування дискретного покриття з заданими параметрами щільності, розміру та просторового розподілу. Розмір дискретної ділянки обирали з умови виключення когезійного розтріскування покриття.

Список літератури

1. Ляшенко, Б., Антонюк, В., Сорока, О., Рутковський, А. (2005). Розробка нових зносостійких покриттів для підвищення експлуатаційних характеристик деталей механізмів. *Вісник Тернопільського державного технічного університету, 10*(1).

2. Криворучко, Д. В., Залога, В. А., Пасечник, В. А., Колесник, В. А., & Емельяненко, С. С. (2013). *Механическая обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов: аналитический обзор*. Сумы.

3. Корбут, Є. В., Парненко, В. С., Ніколаєнко, Т. П., Даниленко, О. В. (2024). Архітектура дискретного покриття робочих поверхонь інструменту для різних схем різання. *Технічні науки та технології, 4*(38), 44–56.

4. Ляшенко, Б. А., Новиков, Н. В., & Клименко, С. А. (2017). *Дискретное модифицирование поверхностного слоя деталей машин и инструментов*. ІСМ ім. В. Н. Бакуля.

5. Антонюк, В. С., Сорока, О. Б., Ляшенко, Б. А. (2007). Дискретні покриття на різальному інструменті. *Проблеми міцності*, (1), 138–143.

6. Антонюк, В. С. (2006). *Основи підвищення працездатності різального інструменту шляхом формування зносостійких покриттів дискретного типу* (Докторська дисертація, НТУУ «КПІ»).

7. Ляшенко, Б. А., Сорока, Е. Б., Рутковский, А. В. (2002). Определение параметров дискретной структуры покрытий с учетом остаточных напряжений. *Проблемы прочности,* (4), 119–125.

8. Корбут, Є. В., Парненко, В. С., Плівак, О. А., & Ніколаєнко, Т. П. (2025). Визначення розмірів дискретних ділянок покриття інструменту для обробки полімерних композитів. *Вісник ХНТУ, 2*(93), 102–110.

9. Кіндрачук, М. В., Яхья, М. С., Корнієнко, А. О., et al. (2008). Визначення параметрів дискретної структури покриттів. *Проблеми тертя та зношування*, 50, 5–15.

10. Сорока, О. Б., Клименко, С. А., Копєйкіна, М. Ю. (2011). Перспективні конструктивні схеми зносостійких покриттів для інструментів та деталей машин. *Процеси механічної обробки в машинобудуванні*, *11*, 259–271.

11. Сорока, О. Б. (2007). Вибір параметрів дискретно-модифікованих зносостійких поверхонь. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»: Приладобудування*, (33), 119–126.

12. Soroka, E. B. (2009). Ensuring stability of PVD coatings by producing a discrete topography with preset parameters. *Journal of Superhard Materials, 31*(5), 347–353.

13. Hanson, M., Stavlid, N., Coronel, E., et al. (2008). On adhesion and metal transfer in sliding contact between TiN and austenitic stainless steel. *Wear, 264*(9-10), 781–787.

14. Avila, R. F., Godoy, G., Abrao, A. M., et al. (2008). Topographic analysis of the crater wear on TiN, Ti(C,N) and (Ti,Al)N coated carbide tools. *Wear, 265*(1-2), 49–56.

References

1. Liashenko, B., Antonyuk, V., Soroka, O., Rutkovskyi, A. (2005). Rozrobka novykh znosostiikykh pokryttiv dlia pidvyshchennia ekspluatatsiinykh kharakterystyk detalei mekhanizmiv. [Development of new wear-resistant coatings to improve the operational characteristics of mechanism parts.] *Visnyk Ternopilskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu – Journal of Ternopil State Technical University, 10(1)*

2. Kryvoruchko, D. V., Zaloga, V. A., Pasechnik, V. A., Kolesnik, V. A., & Emelianenko, S. S. (2013). *Mekhanicheskaia obrabotka kompozitsionnykh materialov pri sborke letatelnykh apparatov: analiticheskii obzor [Mechanical processing of composite materials during the assembly of aircraft: an analytical review].* Sumy.

3. Korbut, Y. V., Parnenko, V. S., Nikolaienko, T. P., Danylenko, O. V. (2024). Arkhitektura dyskretnoho pokryttia robochykh poverkhon′ instrumentu dlia riznykh skhem rizannia [Architecture of discrete coating of tool working surfaces for various cutting schemes]. *Tekhnichni Nauky ta Tekhnolohii – Technical Sciences and Technologies*, *4*(38), 44–56.

4. Liashenko, B. A., Novikov, N. V., Klimenko, S. A. (2017). *Diskretnoe modifitsirovanie poverkhnostnogo sloia detalei mashin i instrumentov* [Discrete modification of the surface layer of parts of machines and tools]. ISM im. V. N. Bakulia.

5. Antonyuk, V. S., Soroka, O. B., Liashenko, B. A. (2007). Dyskretni pokryttia na rizalnomu instrumenti [Discrete coatings on the cutting tool.енті]. *Problemy Mitsnosti – Durability issues*, (1), 138–143.

6. Antonyuk, V. S. (2006). *Osnovy pidvyshchennia pratsiezdatnosti rizalnoho instrumentu shliakhom formuvannia znosostiikykh pokryttiv dyskretnoho typu* [Basics of increasing the performance of cutting tools by forming wear-resistant coatings of a discrete type] (Doctoral dissertation, NTUU “KPI”).

7. Liashenko, B. A., Soroka, E. B., Rutkovskii, A. V. (2002). Opredelenie parametrov diskretnoi struktury pokrytii s uchetom ostatochnykh napriazhenii [Determination of the parameters of the discrete structure covered with consideration of the final stresses]. *Problemy Prochnosti – Durability issues*, (4), 119–125.

8. Korbut, Y. V., Parnenko, V. S., Plivak, O. A., Nikolaienko, T. P. (2025). Vyznachennia rozmiriv dyskretnykh dilianok pokryttia instrumentu dlia obrobky polimernykh kompozytiv. *Visnyk KhNTU, 2*(93), Pt. 1, 102–110.

9. Kindrachuk, M. V., Yakhia, M. S., Korniienko, A. O., et al. (2008). Vyznachennia parametriv dyskretnoi struktury pokryttiv [Determination of parameters of the discrete structure of coatings]. *Problemy Tertia ta Znoshuvannia, Friction and wear problems, 50*, 5–15. Kyiv: NAU-druk.

10. Soroka, O. B., Klymenko, S. A., Kopeĭkina, M. Yu. (2011). Perspektyvni konstruktyvni skhemy znosostiikykh pokryttiv dlia instrumentiv ta detalei mashyn [Prospective design schemes of wear-resistant coatings for tools and machine parts]. *Protsesy mekhanichnoi obrobky v mashynobuduvanni – Processes of mechanical processing in mechanical engineering*, *11*, 259–271.

11. Soroka, O. B. (2007). Vybir parametriv dyskretno-modyfikovanykh znosostiikykh poverkhon [Selection of parameters of discretely modified wear-resistant surfaces]. *Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu Ukrainy "Kyivskyi Politekhnichnyi Instytut": Pryladobuduvannia – Bulletin of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute": Instrumentation, (33)*, 119–126.

12. Soroka, O. B. (2009). Ensuring stability of PVD coatings by producing a discrete topography with preset parameters. *Journal of Superhard Materials*, *31*(5), 347–353.

13. Hanson, M., Stavlid, N., Coronel, E., et al. (2008). On adhesion and metal transfer in sliding contact between TiN and austenitic stainless steel. *Wear, 264*(9-10), 781–787.

14. Avila, R. F., Godoy, G., Abrao, A. M., et al. (2008). Topographic analysis of the crater wear on TiN, Ti(C,N) and (Ti,Al)N coated carbide tools. *Wear*, *265*(1-2), 49–56.

Дата першого надходження статті до видання: 02.01.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.01.2026

UDC 621.891

Oleksandr Petrov[1], Ievgen Korbut[2]

[1]PhD student at the Department at the Machine Design
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: petrovsasha69@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0003-9995-2246

[2]PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department at the Machine Design
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: korbut1@i.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-1221-4052

SELECTION OF THE COMPOSITION AND TOPOGRAPHY OF THE MODIFIED SURFACE LAYER OF THE TOOL FOR PROCESSING POLYMER COMPOSITES

The increasing share of the use of polymer composite materials, in particular carbon fiber, in various industries, as well as the anisotropic nature of their properties, require the use of cutting tools with increased wear resistance, heat resistance, thermal conductivity and low friction coefficient to ensure proper quality of mechanical processing. PCM have a set of properties and features that positively distinguish them from metals and their alloys, which opens up wide opportunities for the development of new designs and technologies of products for various purposes and the improvement of existing ones. However, along with this, their physical and mechanical properties cause a difficulty in cutting processing, which imposes certain requirements on the use of a cutting tool (CT). One of the key aspects in increasing the efficiency and quality of mechanical processing of PCM is the search for technological solutions regarding methods for increasing the efficiency, high reliability and stable operation of the cutting tool. Because the physical and mechanical properties of PCM are different from the properties of metals, this imposes a number of requirements for both the design of the cutting tool and the tool material. In order to increase the wear-resistant properties of tools made of high-speed cutting and hard alloy materials, coatings based on titanium carbide and nitride (TiC, TiN), as well as their complex compounds (TiAlN, TiCN), are actively used. Increasing the cohesive and contact strength of the modified layer is directly related to the formation of a system with a minimum level of stress-strain state.

For the practical implementation of this approach, a general principle has been developed, namely: - the creation of a modified surface layer with increased cohesive strength by replacing the traditional continuous coating with a layer with a discrete structure, which limits the level of maximum stresses both in the modified layer itself and in the contact plane "base-modified surface layer". The paper considers the issue of increasing the performance of a cutting tool (CT) for processing polymer composite materials (PCM) by using wear-resistant coatings of a discrete type, which are applied to the working surfaces of a tool made of high-speed steel (HSS). Due to the result of the analysis of the results of stress-strain calculations, the composition and topography of coatings were determined, which can be recommended for use in cutting polymer composite materials. Methods for experimental determination of residual stresses and numerical calculation of the sizes of discrete sections, which were modelled to assess the mechanical behavior of coatings, are presented.

Keywords*: composite polymer materials (CPM); cutting tool (CT); cutting process; discrete type coating; residual stresses; cohesive strength.*

Fig.: 3. Table: 4. References: 14.

Петров О. Д., Корбут Є. В. Вибір складу та топографії модифікованого поверхневого шару інструмента для обробки полімерних композитів. *Технічні науки та технології*, 2026. № 1(43). С. 79-89. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-79-89.

РОЗДІЛ ІІ. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-90-104
УДК 004.8:004.056:34:330.46

Юлія Миколаївна Ткач[1], Владислав Олександрович Одноколов[2], Тарас Анатолійович Петренко[3]

[1]доктор педагогічних наук, кандидат технічних наук, професор,
завідувач кафедри кібербезпеки та математичного моделювання
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: tkachym79@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-8565-0525

[2]студент-магістр кафедри кібербезпеки та математичного моделювання
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: olexodno@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0004-8157-5259

[3]кандидат технічних наук, доцент кафедри кібербезпеки та математичного моделювання
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: mail_taras@stu.cn.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-5571-3815

РИЗИКИ ВПРОВАДЖЕННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ: БЕЗПЕКОВІ, ПРАВОВІ ТА СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ

У статті здійснено дослідження та систематизацію ризиків інтеграції штучного інтелекту в соціально-економічні та безпекові процеси в умовах цифрової трансформації суспільства. Проаналізовано багатовимірний характер впливу технологій штучного інтелекту на інформаційний простір, ринок праці, захист персональних даних, економічні відносини та національну безпеку. Узагальнено та структуровано основні групи ризиків, пов'язаних із використанням систем штучного інтелекту, зокрема технологічні, правові, етичні, соціальні та безпекові. Розглянуто механізми реалізації зазначених ризиків і потенційні наслідки їх прояву для державних інституцій, бізнес-середовища та суспільства. Окрему увагу приділено міжнародним підходам до регулювання штучного інтелекту, зокрема ризик-орієнтованим моделям, що застосовуються в Європейському Союзі, а також визначено концептуальні напрями мінімізації та регулювання ризиків інтеграції штучного інтелекту.

***Ключові слова**: штучний інтелект; ризики; цифрова трансформація; інформаційна безпека; регулювання штучного інтелекту.*
Рис.: 4. Бібл.: 15

Актуальність теми дослідження. У сучасних умовах штучний інтелект перестав бути лише об'єктом академічних досліджень і перетворився на базову інфраструктурну технологію, від якої залежить повсякденна діяльність мільйонів людей. Це стосується не тільки складних наукових чи військових систем. Це також про звичайні сервіси, якими користуються щодня. Наприклад, стрічка рекомендацій у соцмережах, фільтри спаму, голосові помічники, навігація та інтернет-банкінг. Саме тому будь-які збої, викривлення або зловмисне використання алгоритмів ШІ неминуче набувають суспільного виміру й виходять далеко за рамки суто технічної проблематики.

Як зазначається в класичній монографії С. Рассела та П. Норвіга «Artificial Intelligence: A Modern Approach», а також у Рекомендації Ради Організації економічного співробітництва та розвитку щодо штучного інтелекту (OECD Recommendation of the Council on Artificial Intelligence) і Рекомендації ЮНЕСКО з етики штучного інтелекту (UNESCO Recommendation on the Ethics of Artificial Intelligence) [1; 2; 3], стрімкий розвиток технологій штучного інтелекту (ШІ) є одним із ключових драйверів цифрової трансформації економіки, державного управління та повсякденного життя. Системи машинного навчання вже використовують у банках, медицині, транспорті, освіті, медіа та обороні. Разом із розвитком ШІ з'являються нові ризики. Вони стосуються прав людини, кібербезпеки, інформаційної незалежності та стабільності в суспільстві. Тому потрібно аналізувати ці загрози й мати план дій. Потрібні рішення на кількох рівнях. Це закони, технічний захист, робота організацій і освіта.

© Ю. М. Ткач, В. О. Одноколов, Т. А. Петренко, 2026

Важливо пам'ятати, що ШІ можна використовувати по-різному. З одного боку, він приносить користь. Він допомагає працювати швидше. Він може обробляти великі дані, підказувати рішення і створювати нові сервіси. З іншого боку, ті самі можливості ШІ можна використати зі злим наміром. Їх застосовують для масових інформаційних атак. Вони можуть порушувати приватність. Вони можуть підсилювати дискримінацію. Їх також використовують для кібератак і диверсій. У підсумку це може збільшувати соціальну нерівність.

Аналіз досліджень та публікацій. У науковій та експертній літературі все частіше наголошується, зокрема в «Proposal for a Regulation laying down harmonised rules on artificial intelligence (Artificial Intelligence Act)» Європейської комісії [4], що ризики впровадження ШІ не можна звести лише до помилок алгоритмів або помилкових рішень окремих систем. Йдеться про структурні зміни, які відбуваються в економіці, політиці, медіасередовищі та культурі під впливом інтелектуальних технологій. Саме тому аналіз ризиків ШІ має включати не тільки технічні аспекти (точність моделей, надійність інфраструктури, захист даних), а і правові, етичні, соціальні та геополітичні виміри.

У цій логіці доречно говорити про ризик-орієнтований підхід до розвитку та регулювання ШІ. Його сутність полягає в тому, що різні застосування ШІ мають різний потенціал шкоди, а отже вимагають різних за суворістю режимів контролю. Низькоризикові застосування можна регулювати м'якшими інструментами, зокрема професійними стандартами або кодексами етики. Високоризикові системи потребують жорсткіших правил. Це, наприклад, ШІ в медицині, судах, кредитуванні та керуванні критичною інфраструктурою. Тут важливі якісні дані, прозорість, тестування, аудит і контроль з боку людини.

Далі в тексті розглядаються ризики, про які найчастіше пишуть у дослідженнях і міжнародних документах [1–5; 9; 11; 13]. Перший ризик це дезінформація та маніпуляції громадською думкою. Це загрози приватності й захисту персональних даних. Це алгоритмічна упередженість і дискримінація. Це ризики для критичної інфраструктури та сфери безпеки. Це соціально-економічні наслідки змін на ринку праці. Це також правові та інституційні проблеми. Для кожної групи описано, у чому загроза, як вона може проявлятися і що можна зробити, щоб зменшити ризики.

Для опису практичних кроків управління ризиками ШІ доцільно спиратися на рамку NIST AI Risk Management Framework (AI RMF 1.0), яка структурує роботу з ризиками через етапи governance, mapping, measuring та managing [6].

Мета роботи. Метою статті є дослідження та систематизація ризиків розвитку й інтеграції штучного інтелекту в соціально-економічні та безпекові процеси, а також визначення концептуальних підходів до управління зазначеними ризиками.

Основна частина

1. Дезінформація та інформаційні маніпуляції.

Першим з найбільш помітних викликів є ризики дезінформації та маніпуляцій громадською думкою за допомогою генеративних моделей ШІ. Сучасні системи здатні створювати текст, зображення, аудіо- та відеоконтент, практично не відмінний від реального. Через це можна масово поширювати фейкові новини, deepfake-відео та підроблені документи. Також можна запускати скоординовані кампанії впливу в соцмережах.

У результаті люди можуть менше довіряти медіа, державним органам і виборам. Стратегія протидії у цьому вимірі передбачає розвиток технологій автоматичного виявлення підробленого контенту, маркування штучно згенерованих матеріалів, посилення відповідальності за свідоме поширення дезінформації, а також довгострокові програми з медіаграмотності для різних вікових груп населення, на чому, зокрема, наголошується в OECD Recommendation of the Council on Artificial Intelligence [2].

Генеративні моделі можуть за секунди створити текст або зображення. Через це робити переконливі підробки стало набагато дешевше. Раніше масова кампанія дезінформації вимагала багато грошей і людей. Тепер достатньо налаштувати кілька скриптів, щоб штампувати тисячі постів, коментарів і фейкових акаунтів. У результаті в інформаційному просторі йде постійна боротьба між правдивими повідомленнями й фейками.

Ще небезпечніше, коли генерацію поєднують із мікротаргетингом. Тоді повідомлення підбирають дуже точно під окремі групи або навіть під конкретну людину. ШІ аналізує профіль поведінки, історію пошуку, контакти та реакції. Після цього він "вгадує", на що людина найсильніше реагує. У руках політконсультантів або іноземних спецслужб це дає змогу тихо й точково впливати на громадську думку.

Не менш небезпечними є deepfake-відео, які дозволяють створити візуально достовірні ролики з політиками, військовими, лідерами громадської думки. У кризових ситуаціях - наприклад, під час терактів, військових загострень, техногенних катастроф - навіть короткочасна поява такого відео може призвести до паніки, хаотичних дій населення або нелегітимного тиску на органи влади. Чим вищий рівень напруги в суспільстві, тим легше дезінформації «вкорінитися» в масовій свідомості.

Стратегії протидії дезінформації на базі ШІ можна умовно поділити на технологічні, правові та освітньо-культурні. Технічні заходи включають програми, які знаходять підроблений контент. Вони також включають цифрові мітки для оригінальних матеріалів. Ще один напрям це інструменти, які відстежують, як поширюється підозріла інформація. Але треба розуміти, що повного захисту немає. Зловмисники постійно змінюють свої методи і підлаштовуються під новий захист.

Правовий вимір включає посилення відповідальності за свідоме поширення дезінформації, встановлення вимог до платформ щодо прозорості алгоритмів ранжування контенту й модерації, а також визначення мінімальних стандартів маркування політичної реклами та контенту, що створений або модифікований ШІ. Важливий і міжнародний рівень. Інформаційні атаки часто виходять за межі однієї країни. Тому потрібні спільні дії та координація між державами.

Також важливі освіта і культура. Потрібно підвищувати медіаграмотність і критичне мислення. Навіть найкращі системи пошуку фейків мало допоможуть, якщо люди вірять у все, що бачать у стрічці. Тому потрібні навчальні програми в школах і університетах. Корисні також курси поза навчанням і проєкти громадських організацій. Це допомагає суспільству довше триматися проти дезінформації.

У підсумку ШІ сам по собі не створює фейки. Але він робить їх масовішими, швидшими і більш переконливими.

Тому боротьба з фейками в епоху ШІ – це не тимчасова кампанія, а постійний елемент інформаційної безпеки та політики демократичної держави.

Перед тим як перейти до ілюстративного узагальнення, доцільно зафіксувати ключові механізми інформаційного впливу, які посилюються генеративними моделями (масовість, швидкість і переконливість підробок, мікротаргетинг, deepfake-контент). На рис. 1 показано основні канали, через які ШІ впливає на інформаційний простір та довіру до джерел, і як це переходить у суспільні наслідки.

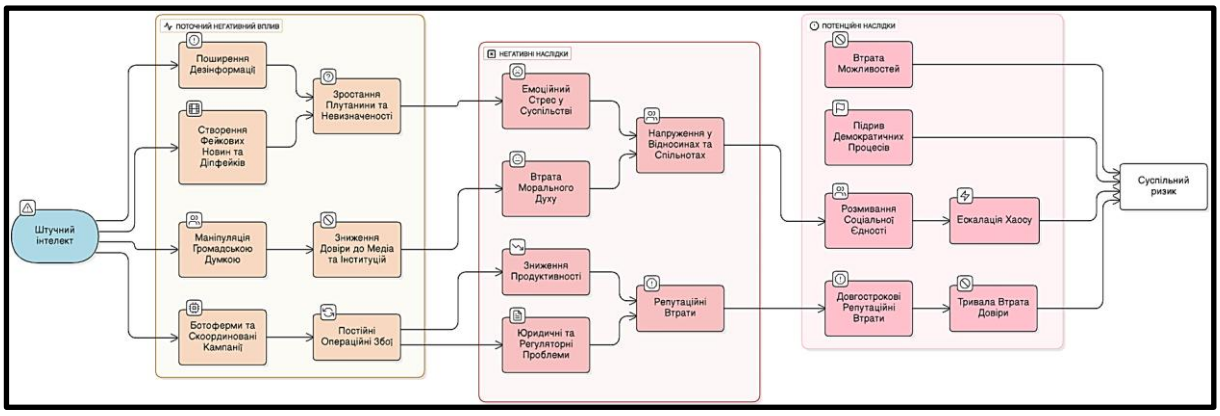


Рис. 1. Схема Впливу Штучного Інтелекту

2. Приватність і персональні дані.

Другий важливий блок ризиків стосується захисту персональних даних і права на приватність. Щоб навчати якісні моделі ШІ, потрібні великі набори даних. Часто там є чутлива інформація про користувачів. Якщо дані погано знеособлені і до них немає контролю доступу, їх можуть вкрасти або використати не так, як треба. Такі набори даних стають ціллю для кібератак і зловживань.

Є ще одна небезпека. Це цифровий нагляд. Алгоритми можуть стежити за людьми в громадських місцях. Вони також можуть стежити за тим, що люди роблять у приватному житті.

Зниження цих ризиків вимагає впровадження принципів “privacy by design”, мінімізації збору даних, проведення оцінки впливу на захист даних для проєктів із використанням ШІ, а також гармонізації національного законодавства з міжнародними стандартами захисту приватності, зокрема з UNESCO Recommendation on the Ethics of Artificial Intelligence та Proposal for a Regulation laying down harmonised rules on artificial intelligence (Artificial Intelligence Act) [3, 4].

У сучасній цифровій економіці дані стали ключовим ресурсом, на основі якого працює більшість бізнес-моделей. Дані про поведінку людей допомагають ШІ працювати. Це вподобання, переміщення і контакти. На основі цих даних ШІ робить прогнози, підлаштовує сервіси під людину і точніше показує рекламу. Але чим більше даних збирають, тим більший ризик для приватності.

Особливо небезпечно, коли дані з різних місць об’єднують. Окремо вони виглядають дрібницями, як-от історія покупок, геолокація, пошукові запити або лайки. Але разом вони стають одним профілем людини. За таким профілем можна здогадатися про здоров’я, гроші, політичні погляди й особисте життя. ШІ може знаходити в цих даних зв’язки, які людина не помітить. Потім це можуть використати так, що для користувача це буде несподівано або неприємно.

Відсутність прозорості щодо того, хто саме збирає дані, з якою метою, як довго їх зберігає, кому передає, створює підґрунтя для численних зловживань. Дані можуть продаватися третім сторонам, використовуватися для дискримінаційного ціноутворення (наприклад, вищі тарифи для певних груп), агресивного маркетингу, політичного таргетингу, а в авторитарних контекстах - і для переслідування опозиції, придушення інакодумства, масового спостереження.

Особливу увагу привертають системи масового відеоспостереження. Їх доповнюють алгоритми, які розпізнають обличчя, емоції та типову поведінку. Офіційно такі системи ставлять заради безпеки, боротьби зі злочинністю або для кращої роботи міста.

У цьому контексті орієнтиром виступає GDPR, який визначає правові підстави обробки даних, права суб'єктів даних та вимоги до безпеки обробки [11].

Але без чітких законів і правил це може обернутися тотальним наглядом. Якщо немає незалежного контролю та реальної відповідальності, такі дані легко використовувати не за призначенням. Тоді дії людини постійно відстежують, записують і аналізують.

Концепція privacy by design означає, що захист приватності потрібно закладати в систему з самого старту, а не додавати "потім", уже після запуску.Це означає мінімізацію збору даних, відокремлення ідентифікаторів, шифрування, локалізацію обробки (наприклад, на пристрої користувача, а не в хмарі), а також обмеження термінів зберігання. Оцінка впливу на захист даних (Data Protection Impact Assessment) дає змогу ще під час проєктування виявити можливі ризики, оцінити їхню ймовірність і масштаб наслідків та визначити заходи для їх зменшення.

У ЄС вимоги до прозорості алгоритмічного ранжування, модерації та управління системними ризиками онлайн-платформ закріплюються Digital Services Act (DSA), що важливо для протидії масштабній дезінформації [12].

Також важливо, щоб національні закони узгоджувалися з міжнародними стандартами захисту даних і приватності. Про це говорять у Рекомендації ЮНЕСКО з етики штучного інтелекту та в проєкті Регламенту ЄС про ШІ (Artificial Intelligence Act) [3,4]. Орієнтиром тут є європейський підхід до захисту персональних даних. Він визначає права людей на свої дані, обов'язки тих, хто ці дані збирає і обробляє, та контроль з боку наглядових органів. Для України та інших країн, які входять у європейський правовий простір, така гармонізація потрібна для довіри до державних цифрових сервісів і для безпечного обміну даними з іншими країнами.

Загалом, право на приватність у добу ШІ перестає бути лише індивідуальною проблемою. Це стає питанням суспільного блага. Масові порушення приватності можуть змінити баланс сили між людьми, державою і компаніями. Це створює умови для маніпуляцій. Люди можуть почати боятися і більше мовчати. Зростає недовіра.

Тому захист персональних даних у темі ШІ це не лише вимога закону. Це також важлива частина демократичної культури.

Щоб структуровано відобразити, у яких точках життєвого циклу даних виникають загрози приватності під час застосування ШІ, нижче подано схематизацію типових сценаріїв порушення приватності та витоків персональних даних. На рис. 2 узагальнено, як поєднання збору даних, профілювання та цифрового нагляду створює ризики зловживань і потребує принципів privacy by design та оцінки впливу на захист даних.

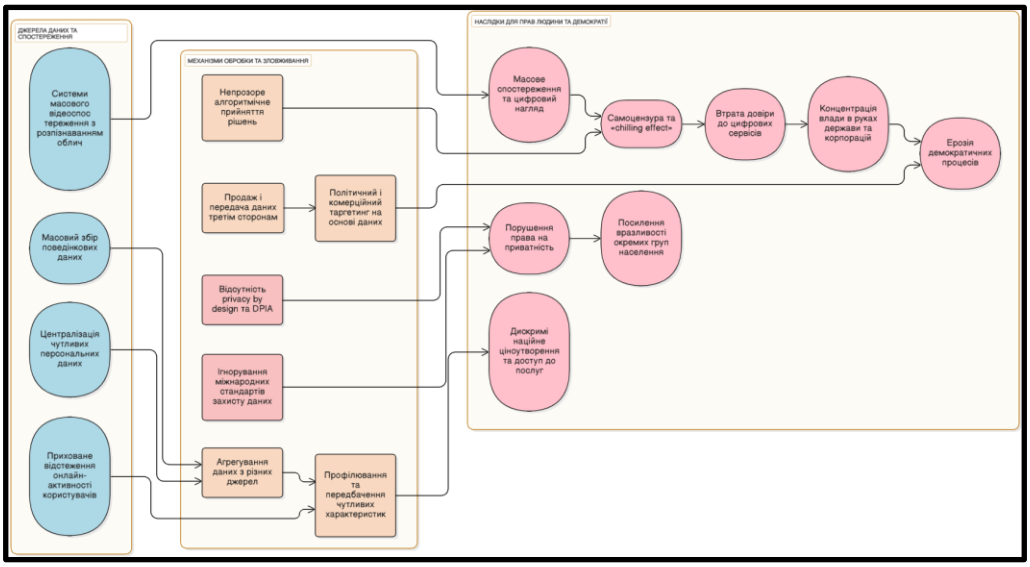


Рис. 2. Схема «Порушення приватності з ШІ»

3. Алгоритмічна упередженість і дискримінація.

Третя група ризиків пов'язана з упередженістю алгоритмів і дискримінацією.

Як зазначається у «Artificial Intelligence: A Modern Approach» та «Ethics Guidelines for Trustworthy AI» [1,5], моделі машинного навчання відображають статистику даних, на яких вони тренуються. Якщо в навчальних даних уже є упередження (за статтю, віком, етнічним походженням, мовою тощо), ШІ може їх повторювати й посилювати. Це особливо небезпечно в таких чутливих сферах, як кредитний скоринг, відбір персоналу, надання соціальної допомоги, правоохоронна діяльність. Щоб запобігти дискримінації, потрібні етичний і технічний аудит моделей, використання метрик справедливості, прозорі критерії ухвалення рішень та збереження принципу, що у високоризикових випадках фінальне рішення має залишатися за людиною.

Алгоритмічна упередженість може виникати на різних етапах життєвого циклу системи ШІ. На етапі збору даних проблема полягає в тому, що історичні дані відображають уже наявні нерівності в суспільстві. Наприклад, якщо в минулому певні групи населення рідше отримували кредити або були недопредставлені в керівних посадах, модель, навчена на цих даних, «сприйматиме» це як норму. У результаті ШІ не лише повторює старі несправедливості, а й може закріплювати їх на майбутнє. Виходить своєрідне "цифрове продовження" дискримінації.

Під час створення моделі упередженість може з'явитися через те, як задають мету системи, як міряють її якість і як побудований сам алгоритм. Наприклад, якщо система налаштована тільки на високу загальну точність, вона може гірше працювати для менших груп. Ці групи рідше є в даних. У підсумку система частіше помиляється саме щодо них.

Така ситуація особливо небезпечна, коли йдеться про захищені категорії, щодо яких діють спеціальні правові гарантії (наприклад, заборона дискримінації за ознакою раси, статі, віку).

Під час впровадження і використання важливо, як люди читають результати і в якому контексті приймають рішення. Навіть "нейтральний" алгоритм може привести до дискримінації. Так буває, коли його висновок сприймають як остаточну правду. Рішення не перевіряють і не враховують обставини. Це особливо небезпечно в поліції, судах і соцслужбах, де рішення сильно впливають на життя людини.

Щоб зменшити упередженість, потрібні кілька кроків. Спочатку треба перевірити дані і зробити їх кращими. Треба прибрати явні перекоси. Треба додати більше даних про менші групи. Також треба стежити, щоб чутливі ознаки не впливали на рішення прямо або через непрямі ознаки. Далі треба міряти справедливість результатів. Це показує, чи модель не працює гірше для одних груп, ніж для інших. І ще потрібні регулярні перевірки моделі. Це має бути технічна перевірка і етична перевірка. Це особливо важливо там, де ризик високий.

У таких випадках фінальне рішення має приймати людина, а не алгоритм. Але це працює тільки тоді, коли людина має час, знання і достатньо інформації. Вона має реально перевіряти поради ШІ. Якщо людина просто натискає "погодитися", це не є контролем і не зменшує ризики.

Алгоритмічна упередженість часто відображає проблеми в суспільстві. Це не завжди проста помилка в програмі. Тому її не виправити лише технічними правками. Потрібні чіткі правила і принципи. Також потрібна розмова про права людини в цифрову епоху.

Алгоритмічна упередженість не є одиничною «помилкою моделі», а часто формується як цикл, у якому історичні перекоси в даних, вибір метрик та практики впровадження взаємно підсилюються; окремим фактором ескалації є отруєння даних і навмисні

маніпуляції. На рисунку 3 показано цей цикл і логіку, чому зниження дискримінаційних ризиків потребує регулярного аудиту даних і моделей та наявності людського контролю у високоризикових застосуваннях.

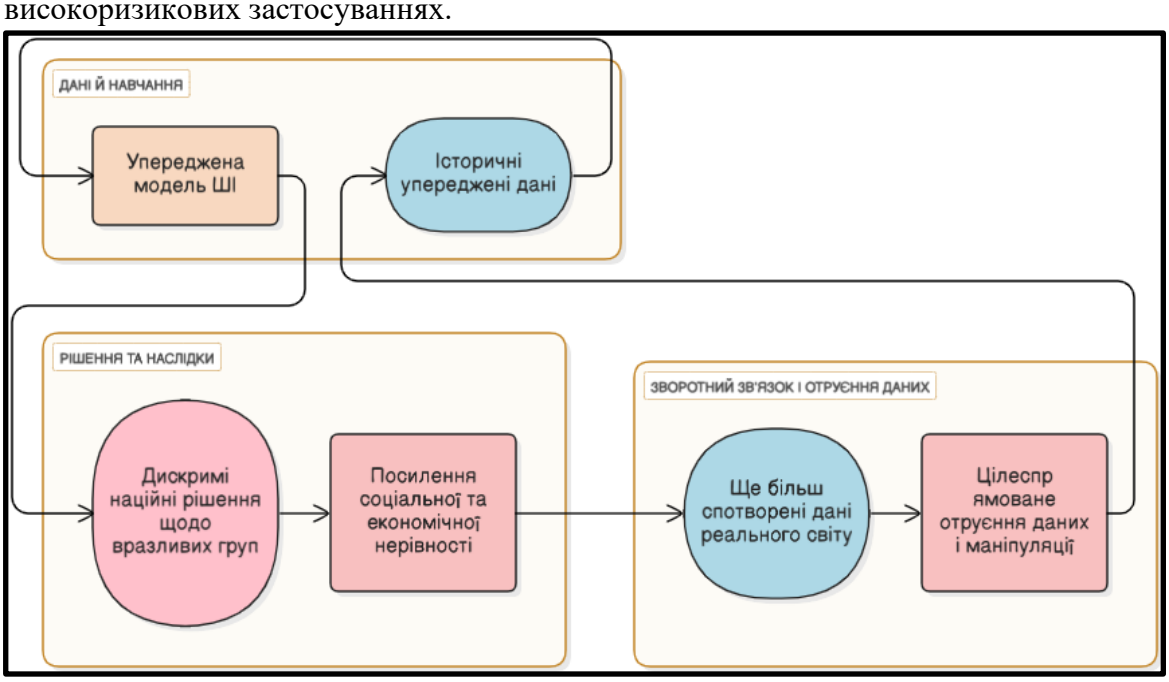


Рис. 3. Схема «Цикл алгоритмічної упередженості та отруєння даних»

4. Критична інфраструктура та безпекова сфера.

Окремий блок ризиків стосується ШІ в критичній інфраструктурі та сфері безпеки. Як зазначено в «OECD Recommendation of the Council on Artificial Intelligence» та «UNESCO Recommendation on the Ethics of Artificial Intelligence» [2,3], такі системи в енергетиці, транспорті, медицині й промисловості можуть підвищувати ефективність. Але водночас вони створюють більше можливостей для кібератак. Злам або підміна роботи таких систем може спричинити масштабні збої й аварії та створити загрози для життя і здоров'я людей. Ще складнішим є питання застосування автономних та напівавтономних систем озброєнь, здатних приймати рішення про застосування сили з мінімальною участю людини. У цьому контексті міжнародні організації наголошують на потребі заборонити повністю автономну летальну зброю, запровадити контроль за експортом таких технологій і виробити міжнародно-правові правила, які визначатимуть відповідальність за наслідки їх застосування.

Критична інфраструктура – це сукупність об'єктів і систем, від функціонування яких залежить життєздатність суспільства й держави. Йдеться про енергетику, транспорт, водопостачання, зв'язок, охорону здоров'я, банківську систему, державне управління. Інтеграція ШІ в такі системи дає низку переваг: можливість прогнозувати аварії, оптимізувати розподіл ресурсів, швидко реагувати на нестандартні ситуації. Водночас будь-яка помилка або злочинне втручання в алгоритм можуть мати катастрофічні наслідки.

Окрему небезпеку становлять кібератаки на ШІ-системи, які керують фізичними процесами. Це може бути "отруєння даних". Зловмисник тихо підміняє навчальні або робочі дані. Через це система поступово починає приймати неправильні рішення. Є й інший тип атак, adversarial-атаки. Тоді роблять спеціальні вхідні сигнали. Для моделі вони виглядають нормальними. Проте модель через них помиляється під час розпізнавання або класифікації.

У транспорті, енергомережах і медичному обладнанні такі атаки можуть викликати серйозні аварії. Для цього не обов'язково мати фізичний доступ до об'єкта.

Описані атаки на ML (зокрема data poisoning та adversarial examples) систематизовані в таксономії NIST, де наведено терміни, типи атак і типові заходи протидії [7].

Окреме питання це ШІ у військовій сфері. Автономні та напівавтономні системи можуть самі знаходити цілі. Вони можуть самі вирішувати, коли застосувати силу. Вони можуть завдавати ударів без прямої команди людини. Прихильники кажуть, що такі системи можуть працювати точніше. Вони також можуть зменшувати ризик для своїх військових. Ще вони можуть діяти швидше в критичні моменти. Але ризик помилок і збоїв дуже високий. Є ризик хакерських атак. Є ризик непередбачуваної поведінки в нових умовах.

Міжнародні організації, правозахисники та експерти часто наголошують на іншому. Вони вважають, що не можна віддавати алгоритмам рішення про життя і смерть. На їхню думку, це суперечить базовим принципам міжнародного гуманітарного права та етики. Тому у світі дедалі частіше говорять про таке. Повністю автономні летальні системи треба заборонити. А якщо ШІ використовують у військовій сфері, має залишатися реальний контроль з боку людини.

Для країн, які стикаються з гібридною агресією, зокрема для України, ШІ в обороні є потрібним, але складним. З одного боку, він допомагає аналізувати розвіддані, виявляти кібератаки і прогнозувати розвиток подій. Це підсилює оборону. З іншого боку, противник може намагатися зламати ці системи або обдурити їх. Для цього він теж може використати ШІ.

ENISA окремо наголошує, що інтеграція ШІ в кіберзахист і критичні системи створює нові поверхні атак (модель, дані, пайплайн, постачальники), що потребує спеціальних вимог до безпеки й тестування [8].

Таким чином, ШІ в критичній інфраструктурі та безпековій сфері – це сфера, де потенціал корисної дії й потенційна шкода є максимальними. Тому саме тут вимоги до надійності, кіберзахисту, прозорості та людського контролю мають бути максимально жорсткими.

5. Соціально-економічні ризики та трансформація ринку праці.

Не менш важливі ризики для економіки та роботи людей. Через автоматизацію рутинних задач і "розумні" системи частина професій може скоротитися або зникнути.

Також може зрости розрив між висококваліфікованими працівниками і тими, хто має низьку зарплату. Якщо держава і бізнес не діятимуть заздалегідь, це може призвести до більшого безробіття, нерівності та невдоволення. Щоб зменшити ці ризики, потрібні програми перекваліфікації та навчання протягом життя. Також важливо розвивати професії, де людина працює разом із ШІ. Ще один крок це стимули для роботодавців, які вкладають гроші в навчання працівників і розвиток їхніх навичок.

У публічних дискусіях щодо ШІ часто звучить питання: "Скільки робочих місць забере ШІ?" Правильніше говорити не про просте "знищення" робочих місць, а про глибоку зміну структури зайнятості. Частина професій справді може зникнути або суттєво скоротитися, але водночас з'являтимуться нові ролі, пов'язані з розробкою, налаштуванням, супроводом, аудитом і етичним контролем ШІ-систем. Проблема полягає в тому, що цей перехід не є автоматичним і безболісним для людей, які сьогодні працюють у професіях, що автоматизуються.

Оцінки впливу генеративного ШІ на кількість і якість робочих місць, а також ризики трансформації зайнятості та умов праці, детально розглянуті в аналітичному звіті Міжнародної організації праці [14].

Найбільш уразливі працівники з низькими цифровими навичками. Також уразливі ті,

чия робота складається з повторюваних і стандартних дій. Це можуть бути оператори контакт-центрів, касири, частина офісних працівників і молодший адміністративний персонал. У багатьох сферах уже зараз з'являються чат-боти, автоматична обробка документів і алгоритми, які попередньо перевіряють заявки. Через це потрібно менше ручної роботи.

Водночас зростає попит на фахівців, які вміють поєднувати технології з конкретною сферою. Це аналітики даних, інженери з машинного навчання, спеціалісти з кібербезпеки, архітектори цифрових платформ, фахівці з етики ШІ та консультанти з цифрової трансформації. Але підготувати таких фахівців складно. На це потрібні час, гроші і якісна освіта. І це доступно не для всіх.

Крім того, ШІ змінює саму організацію праці. Все більше людей працюють через платформи. Це фриланс, віддалена робота і гіг-економіка. Там алгоритми фактично керують роботою. Вони роздають завдання, оцінюють результат і можуть впливати на оплату. Якщо немає нормальних правил і захисту, така робота стає нестабільною. Люди можуть залишатися без соціальних гарантій. Також зростає нерівність між працівником і платформою.

Соціально-економічні ризики через ШІ не означають кінець світу. Але потрібні дії наперед. Потрібні інвестиції в освіту і перекваліфікацію. Потрібні державні програми для розвитку навичок майбутнього. Також важливо зробити справедливий перехід. Люди, які втрачають роботу через автоматизацію, мають отримати реальний шанс перейти в іншу сферу.

Для України є ще один фактор. Економіка багато в чому тримається на ІТ і аутсорсингу. ШІ тут може допомагати ставати сильнішими. Але він також посилює конкуренцію з іншими країнами. Якщо інші країни швидше впровадять ШІ у виробництво і бізнес, частина звичних аутсорсингових послуг може стати менш потрібною. Тоді українським компаніям доведеться переходити на складніші продукти та сервіси.

Це своєю чергою вимагатиме підвищення кваліфікації значної кількості фахівців і створення сприятливих умов для розвитку інноваційних стартапів.

У підсумку ШІ змінює не лише окремі професії. Він також змінює правила між працівником, роботодавцем і державою. Важливо, щоб освіта, соціальний захист і трудові закони оновили вчасно і чесно. Тоді ці зміни можуть дати зростання і нові можливості. Якщо ні, вони можуть привести до нестабільності та конфліктів.

6. Нормативно-правове та інституційне середовище.

Важливою умовою безпечного розвитку ШІ є формування адекватного нормативно-правового та інституційного середовища. На рівні Європейського Союзу вже пропонується регулювання за ризик-орієнтованим підходом, що передбачає жорсткіші вимоги до систем, здатних істотно впливати на права та свободи людини [4]. Для України важливо врахувати ці підходи, коли вона робить свою стратегію розвитку ШІ. Потрібно узгодити стандарти з європейськими правилами. Потрібно створити незалежні органи нагляду. Також варто залучити науковців і громадські організації до обговорення правил використання таких технологій.

Ризик-орієнтований підхід, запропонований у проєкті Регламенту ЄС щодо ШІ (Artificial Intelligence Act) [4], передбачає класифікацію систем ШІ за рівнем ризику. До категорії неприпустимого ризику відносяться практики, які несумісні з правами людини (наприклад, певні форми маніпулятивного впливу на вразливі групи, соціальний скоринг громадян). Такі системи пропонується повністю заборонити.

Категорія високого ризику охоплює системи, які використовують у критично важливих сферах: інфраструктурі, охороні здоров'я, освіті, працевлаштуванні, кредитуванні та правоохоронній діяльності. Для таких систем діють суворі правила. Потрібно правильно керувати даними. Потрібна документація і прозорість. Потрібен контроль з боку людини й сильний кіберзахист. Також потрібна обов'язкова перевірка відповідності. Суть підходу проста. ШІ загалом не треба "душити" правилами. Найбільше уваги треба там, де наслідки можуть бути найважчими.

Системи з обмеженим ризиком здебільшого мають вимоги до прозорості. Наприклад, користувача треба попередити, що він спілкується з ботом. А системи з мінімальним ризиком, як-от ігри чи спам-фільтри, зазвичай не потребують окремого втручання. Це дозволяє одночасно зберігати безпеку і розвивати технології. Також це не створює зайвих вимог для простих продуктів.

Окрім законів є "м'які" правила. Це етичні кодекси, стандарти галузі та поради для розробників і користувачів. Документи ОЕСР, ЮНЕСКО та Європейської комісії [2–5] задають основні принципи. Серед них фокус на людині, повага до прав людини, недискримінація, прозорість, відповідальність і технічна надійність.

Для України узгодження політики щодо ШІ з європейськими підходами є і викликом, і можливістю. Це означає потребу в оновленні законодавства в частині захисту персональних даних, кібербезпеки, електронних комунікацій, стандартизації, а також у створенні спеціалізованих інституцій, відповідальних за нагляд у сфері ШІ. Такими інституціями можуть бути окремі агентства, міжвідомчі ради, етичні комітети, дорадчі органи за участі науковців і представників громадянського суспільства.

Важливо розвивати регуляторні "пісочниці". У них нові ШІ-проєкти тестують в обмежених і контрольованих умовах. За процесом стежить регулятор.

Це дає змогу тестувати нові підходи й не підставляти під ризик багато людей. Також це допомагає державі побачити реальні проблеми та підлаштувати правила.

Але самі закони безпеку не гарантують. Потрібні сильні інституції, які можуть ці закони виконувати. Потрібні фахівці, гроші й ресурси. Потрібні перевірки та покарання за порушення. Також потрібна звичка дотримуватися правил і в державі, і в бізнесі. Тільки за наявності таких умов регулювання ШІ перестає бути декларативним і перетворюється на реальний інструмент управління ризиками.

Результат дослідження. Існуючі підходи до класифікації ризиків використання ШІ часто або (а) описують ризики за доменами застосування (медицина, фінанси тощо), або (б) задають рівні регуляторної суворості залежно від потенційної шкоди. Запропонована в цій статті систематизація доповнює такі підходи тим, що групує ризики за механізмами прояву та окремо виділяє "комбіновані" сценарії, коли ризики різних вимірів зчіплюються в один ланцюжок ескалації. Це дає змогу не тільки перелічити загрози, а й пояснити, чому точкові заходи (наприклад, лише кіберзахист або лише медіаграмотність) можуть бути недостатні.

Оскільки описані групи ризиків у реальних сценаріях рідко проявляються ізольовано, для узагальнення їх взаємного підсилення запропоновано концептуальну схему комбінованих ризиків. На рис. 4 подано діаграму Венна перетину чотирьох вимірів (S1 – S4), яка демонструє типові «ланцюжки ескалації» та пояснює, чому ефективна протидія має бути комплексною, а не зосередженою лише на одному напрямі.

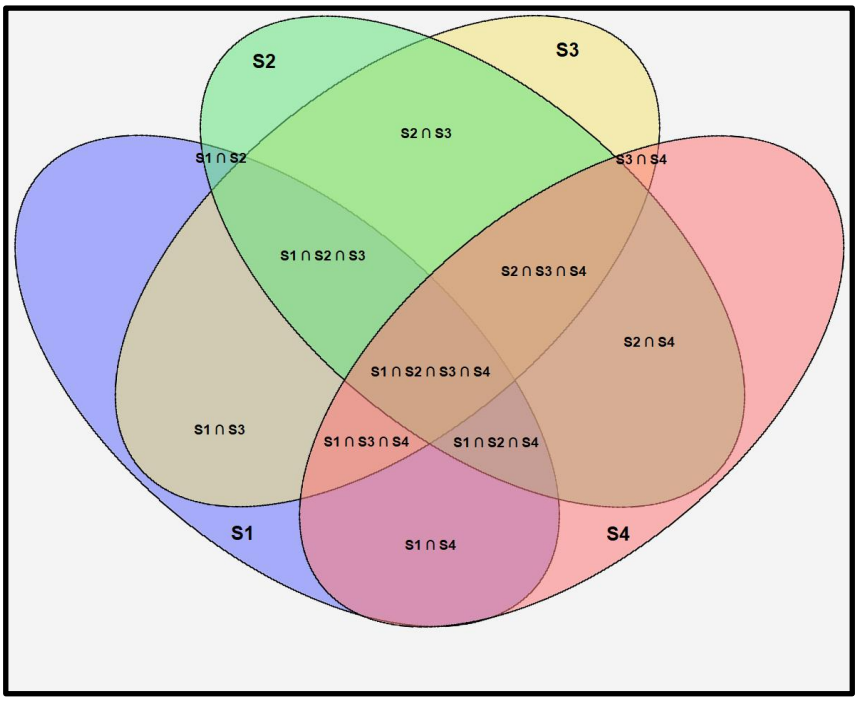


Рис. 4. Групи ризиків впровадження ШІ

(S1) = Інформаційно-комунікативні ризики → «дезінформація, deepfake, підрив довіри»;

(S2) = Приватність, дані, цифровий нагляд → «тотальний збір персональних даних, приховане профілювання, нав'язливий моніторинг і контроль»;

(S3) = Соціально-економічні/дискримінаційні ризики → «алгоритмічна дискримінація, поляризація, нерівність»;

(S4) = Інфраструктурні/безпекові ризики → «критична інфраструктура, аварії/збої, атаки»;

(S1 ∩ S2) → «таргетована дезінформація на основі профілів» / «маніпуляція через персональні дані»;

(S1 ∩ S3) → «радикалізація груп через рекомендаційні системи» / «нормалізація дискримінаційних наративів»;

(S1 ∩ S4) → «інфо-кібератаки + паніка/хаос» / «фейки під час інцидентів інфраструктури»;

(S2 ∩ S3) → «цифрова сегрегація і "соціальні рейтинги"» / «втрата приватності → посилення нерівності»;

(S2 ∩ S4) → «соціальний контроль через дані та критичні системи» / «прицільні атаки й шантаж операторів»;

(S3 ∩ S4) → «нерівний доступ до безпечних технологій і сервісів» / «вразливість груп і регіонів»;

(S1 ∩ S2 ∩ S3) → «маніпуляції + профілювання + дискримінація» → керований вплив, що закріплює нерівність

(S1 ∩ S2 ∩ S4) → «профілі + вплив + важелі інфраструктури» → тиск/шантаж + інформаційне прикриття;

(S1 ∩ S3 ∩ S4) → «фейки + соціальний конфлікт + збої» → поляризація на тлі аварій/атак;

(S2 ∩ S3 ∩ S4) → «дані + сегрегація + інфраструктурний примус» → керована дестабілізація й цифровий контроль;

(S1 ∩ S2 ∩ S3 ∩ S4) → «цифровий авторитаризм: тотальний контроль, руйнація довіри, згортання демократії».

Запропонована діаграма Венна демонструє, що негативні наслідки розвитку генеративного ШІ та зловживання самонавчальними алгоритмами не існують окремо в «ізольованих» сферах, а взаємно підсилюються у чотирьох вимірах: (S1) інформаційно-комунікативному (дезінформація, deepfake, підрив довіри), (S2) приватності й цифрового нагляду (масовий збір даних, профілювання), (S3) соціально-економічному/дискримінаційному (нерівність, поляризація, алгоритмічна дискримінація) та (S4) інфраструктурно-безпековому (атаки, збої критичних систем). Перетини кіл підкреслюють «комбіновані» ризики: наприклад, профілювання робить дезінформацію таргетованою й ефективнішою; рекомендаційні механізми можуть підживлювати радикалізацію та конфлікт; дані й контроль над критичними системами створюють інструменти тиску, шантажу й керованої дестабілізації.

Центральний перетин (S1 ∩ S2 ∩ S3 ∩ S4) узагальнює системний сценарій: «цифровий авторитаризм» - коли одночасно руйнується суспільна довіра, посилюється нерівність, зростає тотальний нагляд і з'являються важелі примусу через інфраструктуру, що веде до згортання демократичних процесів. Практичний сенс схеми: протидія має бути комплексною (медіастійкість + приватність/захист даних + недискримінаційні механізми + кіберстійкість критичної інфраструктури), інакше «латання» лише однієї сфери залишає інші канали для ескалації ризиків.

Висновок. Отже, ризики використання ШІ різні і не зводяться лише до помилок у алгоритмах. Це цілий набір проблем. Сюди входять фейки, втрата приватності, дискримінація, кібератаки і соціальна напруга. Щоб цьому протидіяти, потрібні різні заходи разом. Потрібен технічний захист. Потрібні етичні правила. Потрібні чіткі закони. Потрібні сильні державні органи. Потрібна цифрова грамотність у суспільстві. Лише тоді ШІ може допомагати розвитку, а не створювати нові великі кризи.

Проведена систематизація груп ризиків у вигляді діаграми Венна показує, що ключові негативні наслідки виникають саме у "перетинах": профілювання робить дезінформацію таргетованою; рекомендаційні механізми можуть підсилювати поляризацію й дискримінаційні наративи; контроль над даними та критичною інфраструктурою створює інструменти тиску, шантажу й керованої дестабілізації. Центральний перетин узагальнює системний сценарій "цифрового авторитаризму", коли одночасно зростає нагляд, руйнується довіра, посилюється нерівність і з'являються важелі примусу через інфраструктуру.

Розглянуті в статті групи ризиків - інформаційні, приватнісні, дискримінаційні, інфраструктурні, соціально-економічні та нормативно-правові - тісно пов'язані між собою. Посилення контролю над даними без достатніх гарантій прав людини може породити загрози приватності та зловживання владою. Якщо не звертати уваги на упередженість алгоритмів, люди можуть перестати довіряти цифровим сервісам. Це може статися навіть тоді, коли з кіберзахистом усе добре. Якщо автоматизувати роботу занадто швидко і не робити програм перекваліфікації, зросте соціальна напруга. Це також може підштовхнути частину людей до радикальних настроїв.

Тому стратегія безпечного розвитку й використання ШІ повинна бути міждисциплінарною та міжсекторальною. Вона має об'єднувати інженерів, правників, філософів, економістів, соціологів, освітян, представників громадянського суспільства та бізнесу. Тільки так можна нормально розібратися в проблемі з усіх боків і зробити рішення, які не будуть просто "для вигляду".

Для України це особливо важливо. Країна розвиває ІТ, входить у європейський правовий простір і водночас протистоїть гібридній агресії. Тому управління ризиками ШІ має велике значення. ШІ може стати потужним інструментом відновлення, модернізації та інтеграції в глобальну економіку, але за умови, що його розвиток відбуватиметься в руслі прав людини, демократії та верховенства права.

У цьому контексті міжнародні документи [1–15] можна сприймати як стратегічний орієнтир, однак конкретний шлях кожна країна має визначати самостійно, з урахуванням власних історичних, культурних, економічних і безпекових умов. Якщо цей шлях буде побудований на прозорості, підзвітності, участі громадян і повазі до гідності кожної людини, штучний інтелект стане не загрозою, а партнером у досягненні цілей сталого розвитку.

Нові покоління програмно-апаратного забезпечення повинні бути оснащені сильнішими та зручнішими вбудованими засобами захисту. Слід підвищувати рівень безпеки комп'ютерних мереж, які використовуються для роботи з секретними даними.

Приділяти увагу треба розвитку безпечної і повсюдної електронної ідентифікації (eID), що полегшить транскордонне використання онлайн-послуг та створить умови для інтеграції України у світовий електронний інформаційний простір. Оскільки найгострішим питанням надання електронних послуг провайдерами різних сфер на сьогодні є питання захисту персональних даних споживачів таких послуг, слід посилити контроль за дотриманням вимог законодавства щодо унеможливлення доступу зловмисників до конфіденційних даних споживачів та забезпечення анонімності при eID за рахунок впровадження новітніх технічно-програмних рішень реалізації електронних транзакцій.

З масовим розповсюдженням технології інтернету речей, переходом у хмарні сховища даних, формуванням обліку FinTech, зокрема цифрових та криптовалют, криптобірж, електронних виборів та «розумних контрактів», для зниження небезпечних вразливостей треба ретельно захищати метадані від можливого викрадення унаслідок зловмисних атак.

Найближчими роками важливо не лише "наздогнати" технології, а й навчитися їх контролювати. Для цього треба вкладати гроші в освіту і науку. Треба визначити національні правила, за якими ШІ можна вважати надійним. Треба підтримувати відкриті дослідження ризиків. Також потрібен зв'язок між користувачами, розробниками й державними регуляторами.

Список використаних джерел

1. Russell, S., & Norvig, P. (2010). *Artificial intelligence: A modern approach* (3rd ed.) Prentice Hall. https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781292153971_A27091185/preview-9781292153971_A27091185.pdf.

2. OECD. (2019). *Recommendation of the Council on Artificial Intelligence* (OECD/LEGAL/0449) Organisation for Economic Co-operation and Development. https://oecd.ai/en/assets/files/OECD-LEGAL-0449-en.pdf.

3. UNESCO. (2021). *Recommendation on the Ethics of Artificial Intelligence*. UNESCO. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000381137.

4. European Commission. (2021). *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council laying down harmonised rules on artificial intelligence (Artificial Intelligence Act)* (COM/2021/206 final).EUR-Lex. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021PC0206.

5. High-Level Expert Group on Artificial Intelligence. (2019). *Ethics Guidelines for Trustworthy AI*. European Commission. https://www.europarl.europa.eu/cmsdata/196377/AI%20HLEG_Ethics%20Guidelines%20for%20Trustworthy%20AI.pdf.

6. National Institute of Standards and Technology. (2023). *Artificial Intelligence Risk Management Framework (AI RMF 1.0)* (NIST AI 100-1). U.S. Department of Commerce. https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ai/nist.ai.100-1.pdf.

7. National Institute of Standards and Technology. (2025). *Adversarial Machine Learning: A Taxonomy and Terminology of Attacks and Mitigations* (NIST AI 100-2e2025). U.S. Department of Commerce. https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ai/NIST.AI.100-2e2025.pdf.

8. ENISA. (2020). *Artificial Intelligence Cybersecurity Challenges*. European Union Agency for Cybersecurity. https://www.enisa.europa.eu/publications/artificial-intelligence-cybersecurity-challenges.

9. European Union. (2024). *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. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1689/oj/eng.

10. Council of Europe. (2024). *Council of Europe Framework Convention on Artificial Intelligence and Human Rights, Democracy and the Rule of Law* (CETS No. 225). Council of Europe. https://rm.coe.int/1680afae3c.

11. European Union. (2016). *Regulation (EU) 2016/679 (General Data Protection Regulation)*. Official Journal of the European Union. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/679/oj/eng.

12. European Union. (2022). *Regulation (EU) 2022/2065 on a Single Market for Digital Services (Digital Services Act)*. Official Journal of the European Union. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2022/2065/oj/eng.

13. Council of Europe. (2020). *Recommendation CM/Rec(2020)1 of the Committee of Ministers to member States on the human rights impacts of algorithmic systems*. Council of Europe. https://rm.coe.int/09000016809e1154.

14. Gmyrek, P., Berg, J., & Bescond, D. (2023). *Generative AI and Jobs: A global analysis of potential effects on job quantity and quality* (ILO Working Paper No. 96). International Labour Organization. https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/%40dgreports/%40inst/documents/publication/wcms_890761.pdf.

15. ISO/IEC. (2023). *ISO/IEC 23894:2023 – Artificial intelligence: Guidance on risk management*. International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission. https://www.iso.org/standard/77304.html.

References

1. Russell, S., & Norvig, P. (2010). *Artificial intelligence: A modern approach* (3rd ed.) Prentice Hall. https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781292153971_A27091185/preview-9781292153971_A27091185.pdf.

2. OECD. (2019). *Recommendation of the Council on Artificial Intelligence* (OECD/LEGAL/0449) Organisation for Economic Co-operation and Development. https://oecd.ai/en/assets/files/OECD-LEGAL-0449-en.pdf.

3. UNESCO. (2021). *Recommendation on the Ethics of Artificial Intelligence*. UNESCO. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000381137.

4. European Commission. (2021). *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council laying down harmonised rules on artificial intelligence (Artificial Intelligence Act)* (COM/2021/206 final).EUR-Lex. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021PC0206.

5. High-Level Expert Group on Artificial Intelligence. (2019). *Ethics Guidelines for Trustworthy AI*. European Commission. https://www.europarl.europa.eu/cmsdata/196377/AI%20HLEG_Ethics%20Guidelines%20for%20Trustworthy%20AI.pdf.

6. National Institute of Standards and Technology. (2023). *Artificial Intelligence Risk Management Framework (AI RMF 1.0)* (NIST AI 100-1). U.S. Department of Commerce. https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ai/nist.ai.100-1.pdf.

7. National Institute of Standards and Technology. (2025). *Adversarial Machine Learning: A Taxonomy and Terminology of Attacks and Mitigations* (NIST AI 100-2e2025). U.S. Department of Commerce. https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ai/NIST.AI.100-2e2025.pdf.

8. ENISA. (2020). *Artificial Intelligence Cybersecurity Challenges*. European Union Agency for Cybersecurity. https://www.enisa.europa.eu/publications/artificial-intelligence-cybersecurity-challenges.

9. European Union. (2024). *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. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1689/oj/eng.

10.Council of Europe. (2024). *Council of Europe Framework Convention on Artificial Intelligence and Human Rights, Democracy and the Rule of Law* (CETS No. 225). Council of Europe. https://rm.coe.int/1680afae3c.

11.European Union. (2016). *Regulation (EU) 2016/679 (General Data Protection Regulation)*. Official Journal of the European Union. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/679/oj/eng.

12.European Union. (2022). *Regulation (EU) 2022/2065 on a Single Market for Digital Services (Digital Services Act)*. Official Journal of the European Union. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2022/2065/oj/eng.

13. Council of Europe. (2020). *Recommendation CM/Rec(2020)1 of the Committee of Ministers to member States on the human rights impacts of algorithmic systems*. Council of Europe. https://rm.coe.int/09000016809e1154.

14. Gmyrek, P., Berg, J., & Bescond, D. (2023). *Generative AI and Jobs: A global analysis of potential effects on job quantity and quality* (ILO Working Paper No. 96). International Labour Organization. https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/%40dgreports/%40inst/documents/publication/wcms_890761.pdf.

15. ISO/IEC. (2023). *ISO/IEC 23894:2023 – Artificial intelligence: Guidance on risk management*. International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission. https://www.iso.org/standard/77304.html.

Дата першого надходження статті до видання: 23.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.01.2026

UDC 004.8:004.056:34:330.46

Yuliia Tkach[1], Vladyslav Odnokolov[2], Taras Petrenko[3]

[1]Doctor of Pedagogical Sciences, PhD in Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Cybersecurity and Mathematical Modeling
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: tkachym79@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-8565-0525

[2]Master's Student, Department of Cybersecurity and Mathematical Modeling
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: olexodno@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0004-8157-5259

[3]PhD, associate professor of the Department of Cybersecurity and Mathematical Modeling
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: mail_taras@stu.cn.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-5571-3815

RISKS OF IMPLEMENTATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE: SECURITY, LEGAL, AND SOCIO-ECONOMIC ASPECTS

The article examines and systematizes the risks associated with the development and integration of artificial intelligence into socio-economic and security processes in the context of digital transformation. The multidimensional impact of artificial intelligence technologies on the information environment, labor market, personal data protection, economic relations, and national security is analyzed. The main categories of risks related to the use of artificial intelligence systems are generalized and structured, including technological, legal, ethical, social, and security risks. The mechanisms through which these risks materialize and their potential consequences for public institutions, the business sector, and society as a whole are considered. Particular attention is paid to international approaches to the regulation of artificial intelligence, especially risk-based regulatory models implemented within the European Union. Conceptual directions for minimizing and regulating the risks associated with the integration of artificial intelligence are identified.

Keywords: *artificial intelligence; risks; digital transformation; information security; AI regulation.*
Fig.: 4. References: 15.

Ткач Ю. М., Одноколов В. О., Петренко Т. А. Ризики впровадження штучного інтелекту: безпекові, правові та соціально-економічні аспекти. *Технічні науки та технології*, 2026. № 1(43). С. 90-104. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-90-104.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-105-113
УДК 004.92

Євгеній Сергійович Бобришев
кандидат економічних наук, викладач кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національний університет "Чернігівська політехніка" (Чернігів, Україна)
Email: bobryshew@stu.cn.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0009-7031-1000

МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ТРИВИМІРНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

У статті розглянуто основні методи оптимізації тривимірних моделей, що застосовуються в системах комп'ютерної графіки реального часу. Проаналізовано підходи до зменшення полігональності моделей, використання рівнів деталізації, оптимізації текстур і матеріалів з урахуванням вимог до продуктивності та візуальної якості. Окрему увагу приділено особливостям реалізації процесів оптимізації в середовищі Blender та їх ролі у підготовці моделей для інтерактивних застосунків. Результати дослідження дозволяють сформулювати рекомендації щодо вибору методів оптимізації залежно від умов використання тривимірних моделей у реальному часі.

Ключові слова: *комп'ютерна графіка; тривимірне моделювання; оптимізація моделей; реальний час; рівні деталізації; Blender.*
Табл.: 1. Рис.: 2. Бібл.: 8.

Актуальність теми дослідження. Сучасні системи комп'ютерної графіки реального часу широко застосовуються в ігровій індустрії, системах віртуальної та доповненої реальності, інтерактивних симуляторах і візуалізаційних платформах. Для таких систем ключовими вимогами є висока продуктивність, стабільна частота кадрів і збереження прийнятної візуальної якості. Одним із визначальних чинників, що впливають на ефективність рендерингу в реальному часі, є складність тривимірних моделей, зокрема їхня полігональність, структура топології та характеристики текстур.

Зростання обчислювальних можливостей графічних процесорів не усуває потреби в оптимізації тривимірних моделей, оскільки сучасні сцени часто містять велику кількість об'єктів, складні матеріали та освітлення. Використання неоптимізованих моделей призводить до зниження продуктивності, збільшення часу завантаження сцен і обмежує можливості масштабування графічних застосунків. У зв'язку з цим оптимізація геометрії, текстур і рівнів деталізації є необхідною складовою процесу підготовки 3D-контенту для систем реального часу.

Особливої актуальності набуває питання оптимізації тривимірних моделей у контексті використання універсальних інструментів тривимірного моделювання, зокрема середовища Blender. Blender поєднує засоби полігонального, процедурного та скульптурного моделювання, що створює додаткові вимоги до формування ефективного пайплайну підготовки моделей для інтерактивних застосунків. У цьому контексті дослідження методів оптимізації тривимірних моделей є актуальним завданням для галузі комп'ютерних наук та комп'ютерної графіки й відповідає сучасним тенденціям розвитку технологій реального часу.

Постановка проблеми. У процесі створення тривимірного контенту для систем комп'ютерної графіки реального часу розробники стикаються з проблемою забезпечення балансу між візуальною якістю моделей та продуктивністю їх рендерингу. Сучасні засоби тривимірного моделювання дозволяють створювати високодеталізовані моделі з великою кількістю полігонів, складними матеріалами та текстурами високої роздільної здатності. Однак без належної оптимізації такі моделі є непридатними для використання в інтерактивних застосунках через надмірне навантаження на графічний процесор і зниження швидкодії системи.

Особливо гостро ця проблема проявляється під час підготовки тривимірних моделей у середовищі Blender, де поєднуються різні підходи до моделювання, зокрема полігональне моделювання, скульптинг і процедурні методи. Використання скульптурних моделей із високою щільністю полігональної сітки або некоректно підготовлених текстур ускладнює їх подальше застосування в системах реального часу та потребує додаткових етапів обробки.

© Є. С. Бобришев, 2026

Відсутність системного підходу до вибору та застосування методів оптимізації тривимірних моделей призводить до неефективного використання обчислювальних ресурсів і ускладнює інтеграцію 3D-контенту в ігрові рушії, системи віртуальної реальності та інші інтерактивні платформи. Таким чином, постає проблема необхідності аналізу та систематизації методів оптимізації тривимірних моделей з урахуванням специфіки їх використання в системах комп'ютерної графіки реального часу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика оптимізації тривимірних моделей для систем комп'ютерної графіки реального часу широко представлена в наукових і прикладних дослідженнях, присвячених рендерингу, ігровим рушіям та інтерактивним графічним застосункам. У фундаментальних працях з реального часу комп'ютерної графіки оптимізація геометрії розглядається як один із ключових чинників забезпечення стабільної продуктивності та ефективного використання ресурсів графічного процесора [1]. Автори наголошують, що складність полігональної сітки безпосередньо впливає на швидкість обробки вершин і загальну частоту кадрів.

Окремий напрям досліджень присвячений методам зменшення полігональності тривимірних моделей. У класичних роботах з оптимізації сіток запропоновано алгоритми спрощення геометрії, які дозволяють зменшити кількість полігонів зі збереженням основних форм об'єкта [2]. Такі методи стали основою для сучасних інструментів автоматичної оптимізації, що використовуються в системах тривимірного моделювання та ігрових рушіях.

Значна увага в наукових публікаціях приділяється використанню рівнів деталізації (Level of Detail, LOD) як ефективного засобу оптимізації сцен реального часу. Дослідження показують, що застосування декількох варіантів геометрії з різною деталізацією дозволяє суттєво знизити навантаження на графічний процесор без помітного погіршення візуальної якості сцени [1], [3]. Методи автоматичної генерації LOD активно використовуються в сучасних графічних пайплайнах.

Окрему групу робіт становлять дослідження, присвячені оптимізації текстур і матеріалів. У працях з реального часу рендерингу підкреслюється важливість використання текстурних атласів, стиснення текстур і запікання карт нормалей та навколишнього затінення для зменшення кількості обчислень під час рендерингу [1], [4]. Такі підходи дозволяють компенсувати зниження геометричної складності моделей за рахунок збереження візуальної деталізації.

У контексті практичного тривимірного моделювання значна кількість публікацій присвячена використанню середовища Blender як універсального інструмента створення та оптимізації 3D-контенту. У навчальних і прикладних виданнях Blender розглядається як ефективне середовище для підготовки моделей, орієнтованих на використання в ігрових рушіях і системах реального часу, зокрема через застосування модифікаторів, UV-розгортки та інструментів запікання текстур [5], [6].

В українських наукових і навчальних виданнях питання комп'ютерної графіки та тривимірного моделювання розглядаються переважно з позиції базових принципів побудови графічних сцен, геометричного моделювання та візуалізації [7], [8]. Водночас у цих роботах недостатньо уваги приділяється системному аналізу методів оптимізації тривимірних моделей саме для систем реального часу та інтеграції таких методів у сучасні графічні пайплайни.

Таким чином, аналіз наявних досліджень свідчить про значний обсяг робіт, присвячених окремим аспектам оптимізації тривимірних моделей. Проте питання комплексного узагальнення методів оптимізації з урахуванням специфіки їх застосування в середовищі Blender та системах комп'ютерної графіки реального часу залишається недостатньо висвітленим, що зумовлює актуальність подальших досліджень у даному напрямі.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Аналіз наукових публікацій, присвячених оптимізації тривимірних моделей для систем комп'ютерної графіки реального часу, свідчить про наявність значної кількості досліджень, орієнтованих на окремі аспекти зменшення обчислювального навантаження, зокрема оптимізацію полігональної сітки, використання рівнів деталізації та обробку текстур. Водночас більшість таких робіт розглядає зазначені методи ізольовано, без урахування їх взаємозв'язку в межах єдиного виробничого пайплайну створення 3D-контенту.

Недостатньо дослідженим залишається питання комплексного застосування методів оптимізації тривимірних моделей на етапі підготовки контенту в універсальних середовищах тривимірного моделювання, зокрема Blender. У наявних публікаціях оптимізаційні процедури часто описуються або з позиції алгоритмічної реалізації, або в контексті конкретних ігрових рушіїв, що ускладнює їх узагальнення та адаптацію до різних систем реального часу.

Крім того, у наукових роботах недостатньо уваги приділяється аналізу впливу поєднання геометричної оптимізації, текстурних методів і рівнів деталізації на загальну продуктивність та візуальну якість тривимірних сцен. Відсутність систематизованих рекомендацій щодо вибору та комбінування методів оптимізації залежно від умов використання моделей обмежує практичну цінність наявних досліджень.

Таким чином, існує потреба в узагальненні та систематизації методів оптимізації тривимірних моделей з урахуванням специфіки їх підготовки в середовищі Blender та подальшого застосування в системах комп'ютерної графіки реального часу, що визначає наукову нішу даного дослідження.

Метою дослідження є аналіз і систематизація основних методів оптимізації тривимірних моделей для використання в системах комп'ютерної графіки реального часу, а також визначення їхнього впливу на продуктивність рендерингу та візуальну якість сцен з урахуванням особливостей підготовки 3D-контенту в середовищі Blender.

Виклад основного матеріалу. Оптимізація геометрії є одним із базових і найбільш ефективних методів підвищення продуктивності систем комп'ютерної графіки реального часу. Кількість вершин і полігонів безпосередньо впливає на навантаження графічного процесора, оскільки кожен елемент геометрії проходить етапи трансформації, освітлення та растеризації під час рендерингу сцени [1]. Надмірна полігональність тривимірних моделей призводить до зниження частоти кадрів і обмежує можливості масштабування графічних застосунків.

Одним із найпоширеніших підходів до оптимізації геометрії є зменшення полігональної складності моделі зі збереженням її загальної форми. У дослідженнях з оптимізації сіток запропоновано алгоритми спрощення, що базуються на видаленні малозначущих вершин і ребер із мінімальним впливом на візуальне сприйняття об'єкта [2]. Такі методи дозволяють отримувати спрощені версії моделей, придатні для використання в реальному часі.

Важливу роль у геометричній оптимізації відіграє якість топології тривимірної моделі. Використання впорядкованої quad-топології сприяє рівномірному розподілу полігонів і покращує поведінку моделі під час деформацій та подальшої обробки. Натомість хаотична трикутна сітка або надмірна кількість дрібних полігонів у зонах з незначними змінами форми ускладнює оптимізацію та негативно впливає на продуктивність [3].

У практичному моделюванні часто застосовується скульптурний підхід, який дозволяє створювати високодеталізовані моделі з мільйонами полігонів. Проте такі моделі є непридатними для безпосереднього використання в системах реального часу. Тому обов'язковим етапом підготовки 3D-контенту є ретопологія, що полягає у створенні нової, спрощеної геометричної сітки на основі високополігонального прототипу. Цей підхід дозволяє поєднати візуальну деталізацію з прийнятною обчислювальною складністю [5]. Приклад впливу геометричної оптимізації на структуру тривимірної моделі наведено на рис. 1.

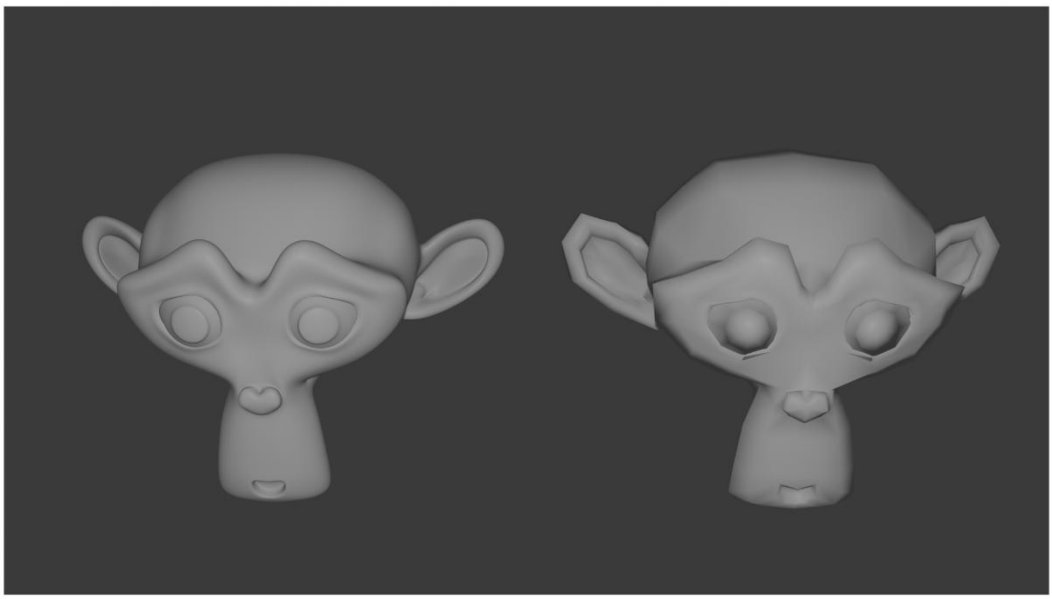


Рис. 1. Порівняння високополігональної та оптимізованої тривимірної моделі
Джерело: розроблено авторами.

У середовищі Blender геометрична оптимізація реалізується за допомогою вбудованих інструментів і модифікаторів, зокрема Decimate, який автоматично зменшує кількість полігонів, та засобів ручного редагування сітки. Використання таких інструментів дає змогу адаптувати складність моделей до вимог конкретних систем реального часу, зберігаючи контроль над якістю результату. Проте автоматичні методи оптимізації потребують обережного застосування, оскільки надмірне спрощення геометрії може призвести до втрати характерних форм і погіршення візуального сприйняття об’єкта.

Таким чином, оптимізація геометрії тривимірних моделей є критично важливим етапом підготовки 3D-контенту для систем комп’ютерної графіки реального часу. Поєднання алгоритмічних методів спрощення, ретопології та раціонального використання інструментів середовища Blender дозволяє досягти балансу між візуальною якістю моделей і продуктивністю рендерингу.

Одним із найбільш ефективних методів оптимізації тривимірних сцен для систем комп’ютерної графіки реального часу є застосування рівнів деталізації (Level of Detail, LOD). Даний підхід полягає у використанні декількох варіантів геометрії того ж самого об’єкта з різною полігональною складністю, які автоматично або динамічно підміняються залежно від відстані до камери, розміру об’єкта на екрані або інших критеріїв [1], [3].

Основна ідея LOD-підходу полягає в тому, що високодеталізована геометрія є доцільною лише тоді, коли об’єкт займає значну частину екранного простору та безпосередньо впливає на візуальне сприйняття сцени. Для віддалених об’єктів використання моделей з великою кількістю полігонів є неефективним, оскільки додаткова геометрична деталізація не сприймається користувачем, але створює зайве навантаження на графічний процесор. Застосування LOD дозволяє істотно зменшити кількість обчислень без помітної втрати якості зображення.

У наукових дослідженнях виділяють **дискретні** та **неперервні** методи реалізації рівнів деталізації. Дискретний підхід передбачає створення фіксованої кількості версій моделі, наприклад, LOD0, LOD1 і LOD2, кожна з яких має заздалегідь визначену полігональну

складність [3]. Неперервні методи, зокрема прогресивні сітки, дозволяють плавно змінювати рівень деталізації геометрії, що зменшує візуальні артефакти під час перемикання між рівнями, але потребує складніших алгоритмічних рішень [2]. Застосування рівнів деталізації для зменшення обчислювального навантаження проілюстровано на рис. 2.

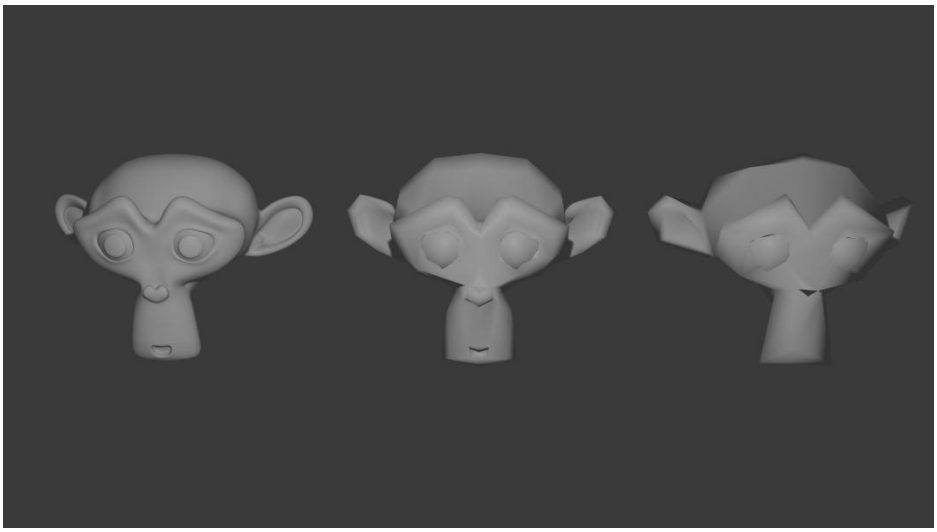


Рис. 2. Приклад використання рівнів деталізації тривимірної моделі
Джерело: розроблено авторами.

Практичне застосування LOD-технологій широко поширене в ігрових рушіях і системах інтерактивної візуалізації. Дослідження в галузі реального часу рендерингу підтверджують, що використання рівнів деталізації є одним із ключових чинників забезпечення стабільної частоти кадрів у складних сценах із великою кількістю об’єктів [1]. Особливо це актуально для відкритих сцен і віртуальних середовищ, де одночасно в полі зору користувача можуть перебувати десятки або сотні тривимірних моделей.

У середовищі Blender підтримка роботи з рівнями деталізації реалізується як на етапі моделювання, так і під час підготовки моделей до експорту в системи реального часу. Розробники можуть вручну створювати декілька варіантів геометрії на основі базової моделі або використовувати інструменти автоматичного спрощення для формування нижчих рівнів деталізації. Такий підхід дозволяє інтегрувати LOD у загальний пайплайн оптимізації та забезпечити сумісність моделей із вимогами ігрових рушіїв і VR/AR-платформ.

Отже, використання рівнів деталізації є важливим елементом оптимізації тривимірних моделей для систем комп’ютерної графіки реального часу. Поєднання геометричної оптимізації та LOD-технологій дозволяє значно підвищити продуктивність рендерингу при збереженні прийнятного рівня візуальної якості сцен.

Оптимізація текстур і матеріалів є не менш важливим етапом підготовки тривимірних моделей для систем комп’ютерної графіки реального часу, ніж оптимізація геометрії. У багатьох випадках саме текстурні операції та обчислення матеріалів створюють основне навантаження на графічний процесор, особливо під час використання складних шейдерів і високороздільних текстур [1], [4]. Надмірна кількість текстурних вибірок і великі обсяги відеопам’яті негативно впливають на продуктивність і масштабованість графічних застосунків.

Одним із ключових методів оптимізації є зменшення кількості текстур і матеріалів, що використовуються в сцені. Дослідження з реального часу рендерингу показують, що кожен додатковий матеріал збільшує кількість викликів рендерингу (draw calls), що призводить до зростання накладних витрат на обробку сцени [1]. У цьому контексті ефективним підходом є використання текстурних атласів, які дозволяють об’єднати декілька текстур в один зображувальний ресурс і зменшити кількість матеріалів, необхідних для відображення об’єктів.

Важливим аспектом оптимізації є вибір роздільної здатності текстур. Використання надмірно великих текстур не завжди призводить до помітного покращення візуальної якості, особливо для об'єктів, що перебувають на значній відстані від камери. У системах реального часу доцільним є застосування текстур з різною роздільною здатністю залежно від ролі об'єкта в сцені та його екранного розміру. Такий підхід дозволяє ефективніше використовувати відеопам'ять і зменшити час завантаження сцен [4].

Окрему роль у процесі оптимізації відіграє запікання карт (texture baking), зокрема карт нормалей, навколишнього затінення та освітлення. Запікання дозволяє перенести частину обчислень зі стадії рендерингу в реальному часі на етап попередньої підготовки контенту. У наукових і прикладних публікаціях зазначається, що використання карт нормалей є ефективним способом імітації високої геометричної деталізації на спрощених моделях, що суттєво знижує обчислювальні витрати під час рендерингу [1], [4].

У контексті фізично коректного рендерингу (Physically Based Rendering, PBR) оптимізація матеріалів полягає в раціональному використанні стандартних параметрів шейдерів і мінімізації кількості додаткових обчислень. Застосування уніфікованих PBR-матеріалів забезпечує узгодженість візуального вигляду об'єктів і полегшує інтеграцію моделей у різні графічні рушії. Водночас надмірне ускладнення шейдерних графів негативно впливає на продуктивність, що особливо критично для систем реального часу.

У середовищі Blender оптимізація текстур і матеріалів реалізується через засоби UV-розгортки, створення текстурних атласів і інструменти запікання. Використання цих можливостей дозволяє підготувати 3D-моделі, орієнтовані на ефективне використання в ігрових рушіях і системах інтерактивної візуалізації. Таким чином, оптимізація текстур і матеріалів є невід'ємною складовою комплексного підходу до підготовки тривимірних моделей для систем комп'ютерної графіки реального часу.

Середовище Blender є універсальним інструментом для створення та підготовки тривимірних моделей, що широко використовується в системах комп'ютерної графіки реального часу. Його особливістю є поєднання засобів полігонального моделювання, скульптингу, процедурних методів і текстурної обробки в межах єдиного робочого середовища. Це створює передумови для формування комплексного підходу до оптимізації 3D-контенту на етапі його підготовки до інтерактивного використання.

Однією з ключових особливостей Blender є можливість поетапної оптимізації моделей у межах єдиного пайплайну. На початкових етапах створення моделі допускається використання високої полігональної складності для досягнення необхідного рівня деталізації, зокрема під час скульптингу. Подальші етапи включають ретопологію, спрощення геометрії та підготовку низькополігональних версій моделей, орієнтованих на використання в системах реального часу [5], [6]. Такий підхід дозволяє зберегти візуальну якість об'єктів при зменшенні обчислювального навантаження.

Blender надає широкий набір модифікаторів, які можуть використовуватися для оптимізації геометрії без руйнування вихідної сітки. Застосування модифікаторів спрощення, дзеркального відображення та інстансування дозволяє зменшити кількість унікальних елементів геометрії та оптимізувати структуру моделей. Важливою перевагою є можливість контролювати ступінь оптимізації та адаптувати її до вимог конкретного проєкту.

Особливу роль у підготовці моделей для реального часу відіграє UV-розгортка та текстурний пайплайн. У Blender реалізовано інструменти, що дозволяють ефективно організувати UV-простір, мінімізувати кількість текстур і підготувати текстурні атласи. У поєднанні з інструментами запікання це забезпечує можливість перенесення високої деталізації з високополігональних моделей на оптимізовані версії, придатні для інтерактивного рендерингу [4], [6].

Важливою особливістю Blender є його орієнтація на сумісність із системами реального часу**.** Підтримка стандартних форматів експорту та відповідність сучасним графічним пайплайнам дозволяють інтегрувати оптимізовані моделі в ігрові рушії та VR/AR-платформи без додаткової обробки. Це робить Blender ефективним інструментом не лише для створення 3D-контенту, але й для його підготовки з урахуванням обмежень реального часу.

Узагальнений пайплайн оптимізації тривимірних моделей у середовищі Blender наведено на рис. 3.

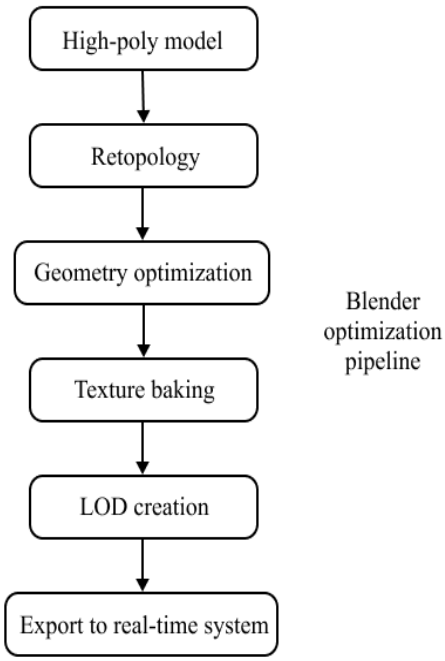


Рис. 3. Пайплайн оптимізації тривимірних моделей у середовищі Blender
Джерело: розроблено авторами.

Таким чином, середовище Blender забезпечує комплексний набір засобів для оптимізації тривимірних моделей, що дозволяє реалізувати поетапний і керований процес підготовки 3D-контенту для систем комп’ютерної графіки реального часу. Раціональне використання інструментів Blender у поєднанні з методами геометричної та текстурної оптимізації сприяє підвищенню продуктивності графічних застосунків без суттєвого погіршення візуальної якості.

Узагальнюючи результати проведеного аналізу, доцільно систематизувати критерії вибору методів оптимізації тривимірних моделей залежно від типу сцени, умов відображення та технічних обмежень цільової платформи. Структуроване представлення таких критеріїв дозволяє підвищити практичну цінність дослідження та спростити прийняття рішень під час підготовки 3D-контенту для систем реального часу. Узагальнені рекомендації щодо вибору методів оптимізації наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Узагальнення критеріїв вибору методів оптимізації тривимірних моделей

Умови використання	**Обмеження**	**Рекомендовані методи оптимізації**	**Коментар**
1	2	3	4
Близька дистанція огляду (LOD0)	Високі вимоги до деталізації	Ретопологія, оптимальна quad-топологія, baking normal maps	Збереження форми при зменшенні полігонів
Середня дистанція (LOD1)	Обмеження GPU	Polygon reduction, LOD	Баланс якості та продуктивності

Закінчення табл. 1

1	2	3	4
Далека дистанція (LOD2–LOD3)	Мінімальне навантаження	Aggressive decimation, impostors	Деталі непомітні
Мобільні платформи	Обмежена відеопам'ять	Texture atlases, low-res textures, мінімум матеріалів	Зменшення draw calls
VR/AR	Висока частота кадрів	Оптимізація геометрії + LOD + baking	Критично для FPS
Великі відкриті сцени	Багато об'єктів	Instancing, LOD, occlusion culling	Масштабування сцени
Архітектурна візуалізація	Висока точність форми	Раціональна топологія, selective subdivision	Локальна деталізація

Джерело: розроблено авторами.

Висновки. У статті проаналізовано та систематизовано основні методи оптимізації тривимірних моделей для використання в системах комп'ютерної графіки реального часу. Результати дослідження свідчать про досягнення поставленої мети та підтверджують доцільність комплексного підходу до підготовки 3D-контенту з урахуванням обмежень продуктивності та вимог до візуальної якості.

Встановлено, що оптимізація геометрії тривимірних моделей, зокрема зменшення полігональної складності, ретопологія та раціональна побудова топології, є базовим чинником підвищення ефективності рендерингу в реальному часі. Застосування рівнів деталізації дозволяє адаптувати складність моделей до умов відображення та суттєво зменшити навантаження на графічний процесор без помітного погіршення візуального сприйняття сцен.

Показано, що оптимізація текстур і матеріалів, включаючи використання текстурних атласів, зменшення роздільної здатності текстур і запікання карт, є ефективним засобом компенсації зниження геометричної деталізації та сприяє зменшенню кількості обчислень під час рендерингу. Поєднання геометричних і текстурних методів оптимізації дозволяє досягти балансу між продуктивністю та якістю зображення.

Обґрунтовано, що середовище Blender забезпечує комплексний набір інструментів для реалізації поетапного процесу оптимізації тривимірних моделей, орієнтованого на використання в системах комп'ютерної графіки реального часу. Раціональне використання можливостей Blender у межах єдиного пайплайну підготовки 3D-контенту сприяє ефективній інтеграції моделей у інтерактивні застосунки та графічні рушії.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання узагальнених критеріїв вибору методів оптимізації (табл. 1) під час підготовки тривимірних моделей для систем реального часу. Перспективами подальших досліджень є аналіз автоматизованих методів оптимізації та оцінювання впливу процедурних підходів на продуктивність і якість тривимірних сцен у реальному часі.

Заява про використання генеративного штучного інтелекту та технологій на основі штучного інтелекту

Під час підготовки даної наукової статті генеративні технології штучного інтелекту використовувалися як допоміжний інструмент для мовного редагування тексту та вдосконалення його стилістичного оформлення. Формування наукової проблеми, аналіз літературних джерел, узагальнення результатів дослідження, інтерпретація отриманих висновків та підготовка ілюстративних матеріалів здійснювалися автором самостійно. Автор несе повну відповідальність за достовірність наведених даних, коректність посилань і дотримання принципів академічної доброчесності.

Список використаних джерел

1. Akenine-Möller, T., Haines, E., & Hoffman, N. (2018). *Real-time rendering* (4th ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781315365459.
2. Hoppe, H. (1996). Progressive meshes. In *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH)* (pp. 99–108). https://doi.org/10.1145/237170.237216.
3. Luebke, D., Reddy, M., Cohen, J. D., Varshney, A., Watson, B., & Huebner, R. (2003). *Level of detail for 3D graphics*. Morgan Kaufmann.
4. Lengyel, E. (2012). *Mathematics for 3D game programming and computer graphics* (3rd ed.). CRC Press.
5. Mullen, T. (2011). *Introducing character animation with Blender*. Wiley Publishing.
6. Roosendaal, T., & Wartmann, F. (2014). *The official Blender guide*. Blender Foundation.
7. Бондаренко, В. П. (2016). *Комп'ютерна графіка*. Видавнича група BHV.
8. Морзе, Н. В., & Барна, О. В. (2010). *Основи комп'ютерної графіки*. Генеза.

References

1. Akenine-Möller, T., Haines, E., & Hoffman, N. (2018). *Real-time rendering* (4th ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781315365459.
2. Hoppe, H. (1996). Progressive meshes. In *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH)* (pp. 99–108). https://doi.org/10.1145/237170.237216.
3. Luebke, D., Reddy, M., Cohen, J. D., Varshney, A., Watson, B., & Huebner, R. (2003). *Level of detail for 3D graphics*. Morgan Kaufmann.
4. Lengyel, E. (2012). *Mathematics for 3D game programming and computer graphics* (3rd ed.). CRC Press.
5. Mullen, T. (2011). *Introducing character animation with Blender*. Wiley Publishing.
6. Roosendaal, T., & Wartmann, F. (2014). *The official Blender guide*. Blender Foundation.
7. Bondarenko, V. P. (2016). *Kompiuterna hrafika [Computer graphics]*. BHV Publishing Group.
8. Morze, N. V., & Barna, O. V. (2010). *Osnovy kompiuternoi hrafiky [Fundamentals of computer graphics]*. Heneza.

Дата першого надходження статті до видання: 15.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 06.01.2026

UDC 004.92

Bobryshev Yevhenii

PhD in economics, Associate Professor of the Department of Informational and computer systems
Chernihiv Polyethnic National University of Ukraine (Chernihiv, Ukraine)
Email: bobryshew@stu.cn.ua.**ORCID:** https://orcid.org/0009-0009-7031-1000

METHODS OF 3D MODEL OPTIMIZATION FOR REAL-TIME APPLICATIONS

The development of real-time computer graphics systems has increased the demand for optimized three-dimensional models suitable for interactive applications. Video games, virtual and augmented reality platforms, and real-time simulators require stable performance and high visual quality under hardware limitations. The complexity of 3D models, including polygon density, topology structure, texture resolution, and material configuration, directly affects rendering performance.

The purpose of this study is to analyze and systematize the main methods of 3D model optimization for real-time computer graphics systems. The research is based on the analysis of scientific sources in real-time rendering and practical approaches to 3D modeling. Particular attention is given to geometric simplification, Level of Detail (LOD) techniques, and texture optimization methods.

The results show that polygon reduction, retopology, and rational topology design significantly improve rendering efficiency. The use of LOD allows dynamic adaptation of model complexity according to viewing distance, reducing computational costs while maintaining acceptable visual quality. Texture optimization, including texture atlases and baking techniques, further decreases GPU workload.

The study confirms that a systematic combination of geometric and texture optimization methods is essential for achieving a balance between performance and visual quality in real-time computer graphics systems. The proposed approach can be applied in the preparation of 3D assets for game engines and interactive applications.

Keywords: *computer graphics; real-time rendering; 3D modeling; model optimization; level of detail; Blender.*

Fig.: 4. References: 8.

Бобришев Є. С. Методи оптимізації тривимірних моделей для реального часу. *Технічні науки та технології*, 2026. № 1(43). С. 105-113. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-105-113.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-114-127
УДК 004.75

Андрій Іванович Роговенко [1], Костянтин Михайлович Клочко [2], Артем Юрійович Милиця[3]

[1]кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: arogovenko@stu.cn.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-4594-5692
ResearcherID: G-3926-2014. **Scopus Author ID:** 57484900000.

[2]студент магістратури, кафедра інформаційних та комп'ютерних систем
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: kostya_klochko@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0003-8555-8723

[3]старший викладач кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: artemmylytsia@stu.cn.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0003-5026-0601

АРХІТЕКТУРА ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КАТАЛОГІЗАЦІЇ КНИЖКОВИХ МЕТАДАНИХ ІЗ JSON API ТА ФЕДЕРАТИВНОЮ СИНХРОНІЗАЦІЄЮ

У статті запропоновано архітектуру децентралізованої системи каталогізації книжкових метаданих, орієнтовану на керування метаданими та інтеграцію з іншими інформаційними сервісами через JSON API. Проаналізовано підходи до федерації метаданих, інтероперабельності та соціальної децентралізації формування метаданих у контексті каталогізаційних систем. Розроблену систему реалізовано у формі вебзастосунку з рольовою моделлю доступу (гість, користувач, модератор, адміністратор), що підтримує перегляд і редагування даних про книги, авторів і видавців, а також надає документований JSON API зі специфікацією OpenAPI (Swagger UI).

Архітектурною основою системи є модульний моноліт із клієнт-серверною взаємодією, локальним сховищем метаданих та підсистемою фонової синхронізації з іншими вузлами федерації. Децентралізацію забезпечено через механізм локального кешування даних, отриманих із серверів федерації, та планову/ручну синхронізацію, що дозволяє зменшити кількість віддалених запитів, підвищити доступність даних при тимчасовій недоступності частини вузлів і забезпечити стабільний час відгуку пошукових запитів. Для збереження узгодженості даних застосовано стратегію «джерело істини», глобально унікальні ідентифікатори UUID та множинні бібліографічні ідентифікатори (ISBN-10, ISBN-13, ASIN) для зіставлення записів.

Запропонований підхід поєднує автономність вузлів федерації, практичні вимоги до продуктивності пошуку та простоту інтеграції із зовнішніми системами, що робить його придатним для використання в навчальних, дослідницьких і спільнотних каталогізаційних сервісах. Робота має архітектурно-проєктний характер і формує основу для подальшого кількісного оцінювання продуктивності та відмовостійкості системи у федеративному середовищі.

Ключові слова: *децентралізація; каталогізація; метадані книг; федерація серверів; вебзастосунок; JSON API; синхронізація; Elixir; Ash; Phoenix; PostgreSQL.*

Рис.: 4. Табл.: 1. Бібл.: 16.

Актуальність теми дослідження. Централізовані системи каталогізації книжкових метаданих мають низку практичних обмежень, пов'язаних зі швидкістю оновлення, актуальністю та доступністю даних. Оскільки модерація та наповнення таких каталогів часто зосереджені в межах обмеженого кола учасників, у базах даних накопичуються прогалини, а внесення нових записів і виправлення помилок потребують значного часу. Це знижує оперативність оновлення метаданих і ускладнює їх повторне використання в зовнішніх інформаційних системах.

Децентралізований підхід, заснований на федерації серверів, дає змогу розподілити функції створення, підтримки та поширення метаданих між незалежними вузлами. Такий підхід потенційно підвищує відмовостійкість, зменшує залежність від одного центрального сервера та створює передумови для інтеграції з іншими сервісами через стандартизовані програмні інтерфейси. У контексті книжкової каталогізації особливо важливим є поєднання децентралізації з практичними вимогами до продуктивного пошуку, узгодженості даних і керованості доступу до редагування метаданих.

Постановка проблеми. Проблема полягає у розробленні інформаційної системи каталогізації книг, яка одночасно:

– забезпечує кероване внесення, редагування та валідацію метаданих;

© А. І. Роговенко, К. М. Клочко, А. Ю. Милиця, 2026

– підтримує інтеграцію з іншими інформаційними системами через програмний інтерфейс;

– мінімізує залежність від єдиного центрального вузла;

– забезпечує продуктивний пошук і доступність даних у разі тимчасової недоступності частини вузлів федерації.

Ключовою технічною вимогою є реалізація механізму синхронізації між серверами федерації, який дає змогу локально кешувати метадані з інших вузлів, виконувати їх зіставлення та використовувати локальне сховище як основу для пошукових сценаріїв.

Вектори атак, унікальні для децентралізованих систем:

– Ін'єкція шкідливих метаданих: зловмисний вузол федерації може надсилати навмисно спотворені або фальсифіковані бібліографічні дані, які потрапляють до локального кешу інших вузлів під час синхронізації.

– Підміна вузла федерації: зловмисник може зареєструвати підроблений сервер федерації та поширювати спам-записи або шкідливий контент через стандартний JSON API.

– UUID-колізії через атаку на генератор: хоча UUID v4 статистично унікальні, компрометований вузол теоретично може генерувати конфліктуючі ідентифікатори для порушення цілісності даних інших учасників.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема управління метаданими у розподілених та федеративних системах розглядається в науковій літературі через призму інтероперабельності, стандартизації та соціальної взаємодії.

Аспект 1: Соціальна децентралізація створення метаданих (Фолксономія vs Таксономія) Важливим напрямком досліджень є аналіз того, як користувачі децентралізовано збагачують метадані книг. У роботі Dani Tellvik (2023) [15] досліджується феномен «фолксономії» (folksonomy) у книговидавництві. Авторка протиставляє її жорстким централізованим таксономіям, таким як коди BISAC (Book Industry Standards and Communication), які контролюються галузевими комітетами. [13, 15] Дослідження показує, що читачі через платформи на кшталт Goodreads створюють «живий цифровий архів» свого читацького досвіду, який є гнучкішим та швидшим у реагуванні на зміни в мові та культурі, ніж централізовані системи. [15] Tellvik зазначає, що фолксономія — це «система класифікації знизу-вгору», яка виникає із соціального тегування, де метадані генеруються не експертами, а споживачами контенту. [15]

Аспект 2: Федерація колекцій та проблеми інтероперабельності Питання об'єднання (федерації) метаданих з різних джерел ґрунтовно розглянуто у роботах Palmer et al. (2007) [13] та Palmer & Knutson (2004) [16],. Дослідники вказують на те, що навіть при використанні таких стандартів, як OAI-PMH та Dublin Core, створення єдиного простору доступу до розподілених колекцій стикається з проблемою різнорідних «культур опису» [13, 16],. Різні інституції та спільноти використовують метадані по-різному, що ускладнює їх автоматичну агрегацію без втрати контексту. Зокрема, Palmer et al. підкреслюють, що агрегація часто призводить до втрати «контекстуальної маси» (contextual mass), необхідної для повноцінного пошуку та розуміння об'єктів. [13]

Аспект 3: Технічні виклики інтеграції різнорідних даних Ordonez et al. (2007) [14] розглядають технічні аспекти управління метаданими у федеративних базах даних. Вони підкреслюють складність інтеграції структурованих даних (бази даних) та напівструктурованих даних (документи, файли), які часто знаходяться поза межами основного сховища. [14] Їхній підхід пропонує використання реляційної бази даних як центрального репозиторію для відстеження зв'язків між об'єктами у розподіленому середовищі, що дозволяє вирішувати проблеми неповноти та неузгодженості даних за допомогою SQL-запитів [14; 15].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Незважаючи на значний обсяг досліджень у сфері цифрових бібліотек та соціального тегування, низка аспектів залишається недостатньо вивченою в контексті сучасних децентралізованих протоколів (таких як ActivityPub):

1. Архітектурна децентралізація збереження контексту. Більшість досліджень, зокрема Palmer et al., розглядають федерацію як створення централізованого реєстру або репозиторію, який збирає (harvests) дані з розподілених джерел [13, 16]. Недослідженим залишається питання ефективного збереження метаданих у повністю децентралізованих мережах, де відсутній єдиний вузол агрегації, але необхідно зберігати зв'язність даних.

2. Гібридизація фолксономій та стандартів у федеративному середовищі. Tellvik пропонує ідею «коллабулярію» (collabulary) — гібриду таксономії та фолксономії, де експерти співпрацюють зі споживачами [15]. Однак механізми автоматичної синхронізації таких гібридних метаданих між різними вузлами децентралізованої мережі (instance-to-instance) практично не висвітлені в технічній літературі.

3. Вирішення конфліктів даних без центрального арбітра. Ordonez et al.[14] пропонують централізований репозиторій для вирішення проблем неузгодженості даних. [16] Проте у випадку децентралізованих систем (як BookWyrm), де кожен вузол може мати власну версію опису книги, відсутні загальноприйняті алгоритми консенсусу для об'єднання суперечливих метаданих без втрати унікального локального контексту.

Серед поширених систем, які працюють із книжковими даними, можна виділити Goodreads, BookWyrm та Open Library. Goodreads орієнтована на соціальні сценарії та використовує централізовану модель, тоді як BookWyrm підтримує децентралізацію на основі ActivityPub, а Open Library надає каталогізаційний сервіс з API. Для визначення цільових характеристик розробленої системи виконано порівняння за критеріями централізованості, наявності API, типу інтерфейсу, можливостей пошуку та відкритості коду (табл. 1).

Таблиця 1 – Порівняння систем каталогізації книг

Критерій	Goodreads	BookWyrm	Open Library	Розроблена система
Централізованість	+	-	+	-
Децентралізованість	-	+	-	+
API для інтеграції	-	+	+	+
Тип інтерфейсу	-	ActivityPub JSON	JSON/RDF	JSON
Пошук	+	+	+	+
Пошук через API	-	-	+	+
Ліцензія/відкритість коду	пропрієтарна	ACSL	AGPLv3	AGPLv3
Додавання даних через запит	+	+	+	+

Мета дослідження. Розроблення інформаційної системи у формі вебзастосунку для децентралізованої каталогізації книжкових метаданих, яка забезпечує керування метаданими, інтеграцію з іншими сервісами через JSON API та синхронізацію між серверами федерації.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв’язати такі завдання: обґрунтувати вибір технологічного стека з урахуванням функціональних вимог до вебінтерфейсу, API, ролей доступу та фонової обробки задач; спроєктувати модульну архітектуру системи та модель даних з підтримкою рольового доступу, федеративної взаємодії та збереження походження записів; реалізувати реактивний адаптивний вебінтерфейс для роботи з каталогами книг, авторів і видавців; розробити документований JSON API для інтеграції з зовнішніми сервісами та вузлами федерації; реалізувати механізм децентралізованої синхронізації з локальним кешуванням даних, фоновим виконанням задач

і засобами адміністрування процесу синхронізації; обґрунтувати вибір стратегії локального кешування як базового підходу до федеративного пошуку порівняно зі сценарієм прямого проксіювання запитів.

Виклад основного матеріалу. Для вирішення поставлених завдань проєктування системи виконано аналіз технологічних рішень, обґрунтовано вибір архітектурного підходу та визначено компонентну структуру системи. Основний акцент зроблено на забезпеченні балансу між функціональними можливостями, простотою підтримки та операційною ефективністю.

Архітектура системи та технологічний стек. Система спроєктована за клієнт-серверною архітектурою та реалізована як модульний моноліт. Такий підхід зберігає переваги модульності (чітке розділення доменних контекстів, інтеграцій, доступу до даних, UI) і водночас зменшує операційну складність порівняно з мікросервісами, що є критичним для невеликих команд розробки та навчальних/дослідницьких інфраструктур. Узагальнену взаємодію компонентів системи наведено на рисунку 1.

На серверній стороні використано мову Elixir, яка працює на віртуальній машині BEAM, і забезпечує ефективну конкурентність, ізоляцію процесів і стійкість до збоїв, а також добре підходить для вебсценаріїв з великою кількістю одночасних підключень [4]. Вебрівень реалізовано з допомогою Phoenix Framework, який надає механізми маршрутизації, контролерів, шаблонізації та роботу з WebSocket, а також типові практики побудови вебзастосунків [2].

Для побудови інтерфейсу обрано архітектуру з мінімалістичним реактивним дизайном та адаптивною верстkою. Phoenix LiveView забезпечує інтерактивність в реальному часі без необхідності писати складний клієнтський JavaScript, а також дозволяє централізовано контролювати видимість даних відповідно до ролей користувачів безпосередньо на сервері [3]. Для оформлення інтерфейсу застосовано TailwindCSS і Flowbite, що дає змогу швидко створювати адаптивні сторінки з уніфікованим мінімалістичним дизайном [9; 10].

Сховище даних реалізовано на PostgreSQL, що забезпечує транзакційність, цілісність і розвинені можливості індексації для пошукових сценаріїв за назвою та ідентифікаторами книг [5].

Для розгортання використано контейнеризацію Docker, що стандартизує середовище виконання і спрощує інсталяцію/оновлення [6]. Для маршрутизації трафіку та термінації TLS застосовано reverse proxy Nginx, який також дозволяє централізовано налаштувати HTTPS та оптимізувати доставку статичних ресурсів [7].

Децентралізація реалізована через JSON API та механізми синхронізації: дані, отримані з інших вузлів федерації, кешуються локально, що зменшує кількість віддалених запитів під час пошуку та підвищує доступність при тимчасовій недоступності частини вузлів. Планові й ручні задачі синхронізації виконуються у фоні через Oban, що забезпечує черги задач, повторні спроби та спостережуваність виконання [8].

Узагальнена схема взаємодії та архітектура наведена на рис. 1-2.

Користувачі взаємодіють з системою з допомогою вебінтерфейсу, а системи взаємодіють між собою по JSON API для синхронізації даних. Система може складатися з сервера каталогізації (DBI), базиданих (Postgres), які працюють як докер контейнери на віртуальній машині з Debian. Для взаємодії по https треба реверс проксі, на приклад, Nginx з налаштованими SSL сертифікатами.

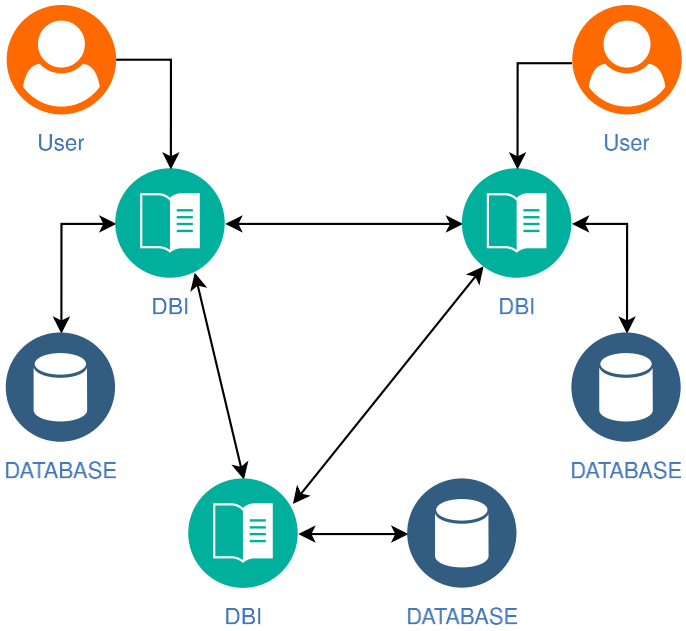


Рис. 1. Узагальнена схема взаємодії компонентів системи каталогізації книжкових метаданих

Джерело: розроблено авторами.

Примітка: клієнтський браузер взаємодіє з вебзастосунком через вебінтерфейс (LiveView) чи JSON API, який працює з PostgreSQL та виконує синхронізацію через JSON API з іншими серверами федерації.

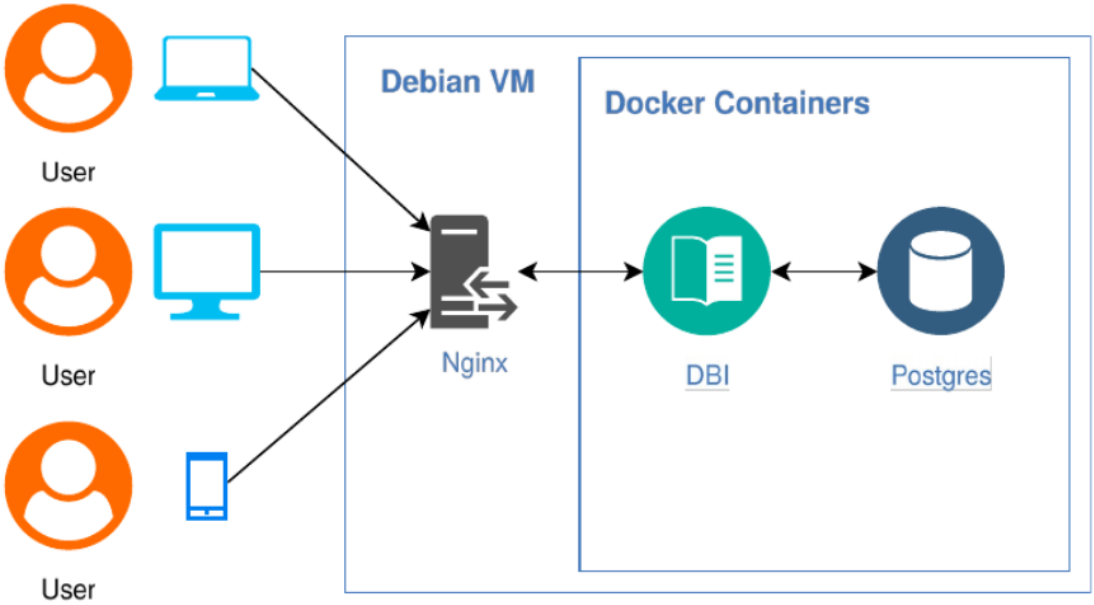


Рис. 2. Узагальнена архітектура системи каталогізації книжкових метаданих

Джерело: розроблено авторами.

Модель даних. Сховище даних реалізовано на PostgreSQL [5] та спроєктовано з урахуванням потреб пошуку, федерації і контролю походження записів. Базовою сутністю є ресурс «книга», для якого зберігаються назва, опис, посилання на обкладинку, дата публікації, мова, формат, кількість сторінок та зв’язки з видавцем і реєстром видань. Для забезпечення цілісності даних передбачено нормалізовані зв’язки та обмеження, а також

індексацію полів, що використовуються у фільтрації та пошуку. Крім того, всі записи використовують UUID як первинні ключі замість послідовних числових ідентифікаторів. Це критично важливо для федерації: UUID генеруються незалежно на кожному вузлі без координації, що усуває конфлікти ідентифікаторів при синхронізації записів з різних серверів. Комбінація UUID для внутрішньої ідентифікації та стандартних бібліографічних ідентифікаторів (ISBN) для зіставлення створює надійну основу для роботи федерації без центрального координатора.

Окремою сутністю виділено ідентифікатори книг (ISBN-10/ISBN-13/ASIN тощо) з атрибутами «тип», «значення» і «порядок сортування». Таке представлення дозволяє виконувати пошук за різними ключами (наприклад, за ISBN-13 та ASIN) без дублювання атрибутів у таблиці книг і без жорсткої прив'язки до конкретного стандарту ідентифікації. При синхронізації ідентифікатори використовуються як додаткові ключі зіставлення та для підвищення точності пошукових сценаріїв у федерації.

Для зв'язку «книга–автор» використано окрему сутність із ролями участі (автор, редактор, перекладач тощо) та порядком відображення. Це дозволяє зберігати не лише факт авторства, а й семантику внеску, що важливо для коректного відображення бібліографічного опису та для інтеграції з зовнішніми інструментами. Структура доменних ресурсів, зв'язків і політик доступу описується декларативно засобами Ash, що забезпечує узгодженість між вебінтерфейсом і API [1].

Запропоновану архітектуру розглянуто як базову модель для подальшої експериментальної валідації в умовах масштабування обсягу метаданих та кількості вузлів федерації.

Реалізація JSON API та інтеграції. JSON API реалізовано як набір endpoint-ів для читання каталогів і окремих елементів (книги, автори, видавці, сервери федерації), а також для отримання ідентифікаторів книги й ролей авторів. API підтримує посторінкову навігацію та фільтрацію (зокрема за назвою), що дозволяє ефективно будувати інтеграції зі сторонніми сервісами та клієнтами. Реалізація базується на Phoenix і Ash, де Ash визначає ресурси/дії/доступ, а Phoenix надає HTTP-шар і маршрутизацію [1; 2].

Публічна частина JSON API реалізує read-only endpoint-и (GET) без автентифікації, що спрощує інтеграцію. Операції модифікації метаданих виконуються через вебінтерфейс із рольовим контролем доступу.

Для пошуку книг за ідентифікатором (ISBN-13/ISBN-10/ASIN) передбачено окремий endpoint, що спрощує інтеграційні сценарії: зовнішня система може передати відомий ідентифікатор і отримати нормалізований запис книги з пов'язаними авторами, видавцем та набором ідентифікаторів. Це підвищує сумісність із бібліографічними інструментами, які оперують різними стандартами ідентифікації.

Специфікація API публікується через Swagger UI (OpenAPI), що формалізує контракт, зменшує ризик розходження реалізації та документації, а також дозволяє тестувати інтеграції на рівні схем/типів і прикладів запитів-відповідей. Документування є важливим також для федерації, оскільки сервери повинні взаємодіяти за єдиним узгодженим протоколом.

Механізм децентралізації та синхронізації. Децентралізація реалізована синхронізацією даних із серверів федерації, що дозволяє отримати дані з допомогою лише GET запитів без необхідності автентифікації. Для цього розроблено модулі клієнтів API (отримання JSON-даних з публічного API із підтримкою пагінації), підсистему перетворення даних у внутрішні структури, механізми зіставлення та злиття з локальною БД, а також контур керування задачами синхронізації. Локальне кешування метаданих дозволяє виконувати пошук переважно по локальній БД, зменшуючи кількість віддалених викликів і підвищуючи стійкість до мережевих збоїв.

Виконання планових задач організовано за допомогою Oban: синхронізація запускається щоденно опівночі або вручну адміністратором, а результати та статуси виконання доступні в адміністративній панелі. Обраний підхід забезпечує керованість фонових процесів (черги, повторні спроби, обмеження конкурентності) та прозорість виконання синхронізацій [8].

Редагування записів, отриманих з інших серверів, обмежено: зміна таких об’єктів через UI не допускається, що запобігає конфліктам і гарантує, що «джерело істини» залишається на вузлі, де запис створено. Натомість локальний вузол може створювати власні записи та публікувати їх через JSON API для інших учасників федерації. Така стратегія узгоджує відповідальність за дані та спрощує трасування походження записів.

Обґрунтування стратегії локального кешування. При проєктуванні механізму федеративного пошуку розглянуто альтернативний підхід — пряме проксіювання запитів до серверів федерації в реальному часі. Однак такий підхід має суттєві недоліки: час відгуку обмежується найповільнішим сервером у федерації, недоступність частини вузлів призводить до неповноти результатів пошуку, а складність агрегації та дедуплікації даних з різних джерел у реальному часі підвищує ймовірність помилок і ускладнює підтримку коду. Крім того, кожен пошуковий запит користувача генерує множинні HTTP-виклики до зовнішніх серверів, що створює надмірне навантаження на інфраструктуру федерації.

Обрана стратегія локального кешування усуває ці обмеження: пошук виконується виключно по локальній БД з використанням індексів, що забезпечує стабільний і швидкий час відгуку; система залишається працездатною при тимчасовій недоступності зовнішніх серверів; зіставлення та дедуплікація записів виконуються під час фонової синхронізації без впливу на користувацькі запити; навантаження на сервери федерації розподіляється у часі завдяки плановим синхронізаціям замість запитів у реальному часі. Компромісом є затримка актуалізації даних до наступної синхронізації, що є прийнятним для каталогізаційних систем, де метадані книг змінюються рідко і не потребують миттєвого оновлення.

Система має механізми захисту інформації та вузлів: білий список серверів для синхронізації, який налаштовується адміністратором, валідація вхідних даних та обмеження редагування даних з інших вузлів.

Хоча публічний API навмисно реалізований без автентифікації для читання, реєстрація серверів федерації в адміністративній панелі формує перший бар'єр: тільки явно зареєстровані вузли беруть участь у синхронізації.

Усі дані, отримані із зовнішніх вузлів, повинні проходити схемну валідацію перед записом у локальну БД. Синхронізація виконується в кілька етапів: отримання JSON запису, трансформування, перевірка наявності, запис даних за потреби до БД. Ash-ресурси з їх декларативними обмеженнями вже закладають основу для цього, однак варто явно зазначити, що трансформатор вхідних даних реалізують перевірки форматів даних (ISBN, UUID, тощо).

Стратегія «джерело істини» як механізм безпеки. Заборона редагування синхронізованих записів виконує подвійну функцію: крім збереження узгодженості даних, вона запобігає поширенню шкідливих змін зі скомпрометованого вузла через ланцюжок синхронізацій.

Запропоновані рішення виявлених проблем. Для вирішення описаних вище проблем у розробленій системі реалізовано комплекс архітектурних та технічних рішень:

Рішення проблеми 1 (децентралізоване збереження контексту): архітектура з локальним кешуванням метаданих на кожному вузлі федерації. Кожен сервер зберігає повну копію синхронізованих даних, що усуває залежність від центрального репозиторію та забезпечує працездатність системи при недоступності частини вузлів. Пошук виконується по локальній базі даних, що гарантує стабільний час відгуку незалежно від стану федерації.

Рішення проблеми 2 (інтеграція гібридних метаданих): відкритий JSON API без вимог автентифікації для читання, що дозволяє вузлам федерації обмінюватися даними через стандартизовані GET-запити. Структура метаданих включає не лише обов'язкові бібліографічні поля (назва, автори, видавець), а й розширювані атрибути (множинні ідентифікатори, ролі авторів, формати видань), що створює основу для інтеграції як експертних, так і користувацьких даних. Документування через OpenAPI забезпечує узгодженість протоколу між вузлами.

Рішення проблеми 3 (конфлікти даних та ідентифікація): стратегія «джерело істини» у поєднанні з глобально унікальними ідентифікаторами (UUID). Кожен запис зберігає інформацію про вузол-джерело та має UUID як первинний ключ, що гарантує унікальність ідентифікаторів навіть при одночасному створенні записів на різних серверах федерації. На відміну від послідовних числових ID, UUID генеруються незалежно на кожному вузлі без необхідності координації чи центрального лічильника, що усуває клас конфліктів ідентифікації при синхронізації.

Локальний вузол не дозволяє редагувати записи, синхронізовані з інших серверів, — зміни можливі лише на вузлі-джерелі, що усуває конфлікти версій. При зіставленні записів під час синхронізації використовуються множинні ідентифікатори (ISBN-13, ISBN-10, ASIN) як ключі, що підвищує точність зіставлення та зменшує ймовірність дублювання. Така модель зберігає автономію вузлів і водночас забезпечує трасованість походження даних.

Вирішення цих проблем формує основу для створення децентралізованої системи каталогізації, яка поєднує переваги федерації (розподіл навантаження, відмовостійкість, автономність вузлів) з практичними вимогами продуктивності, узгодженості даних та простоти інтеграції.

Реалізація системи та інтерфейси. Систему реалізовано згідно з описаною архітектурою (рис 2.). Головна сторінка з каталогом книг реалізована з мінімалістичним адаптивним інтерфейс з можливістю пошуку та фільтрації (рис 3.).

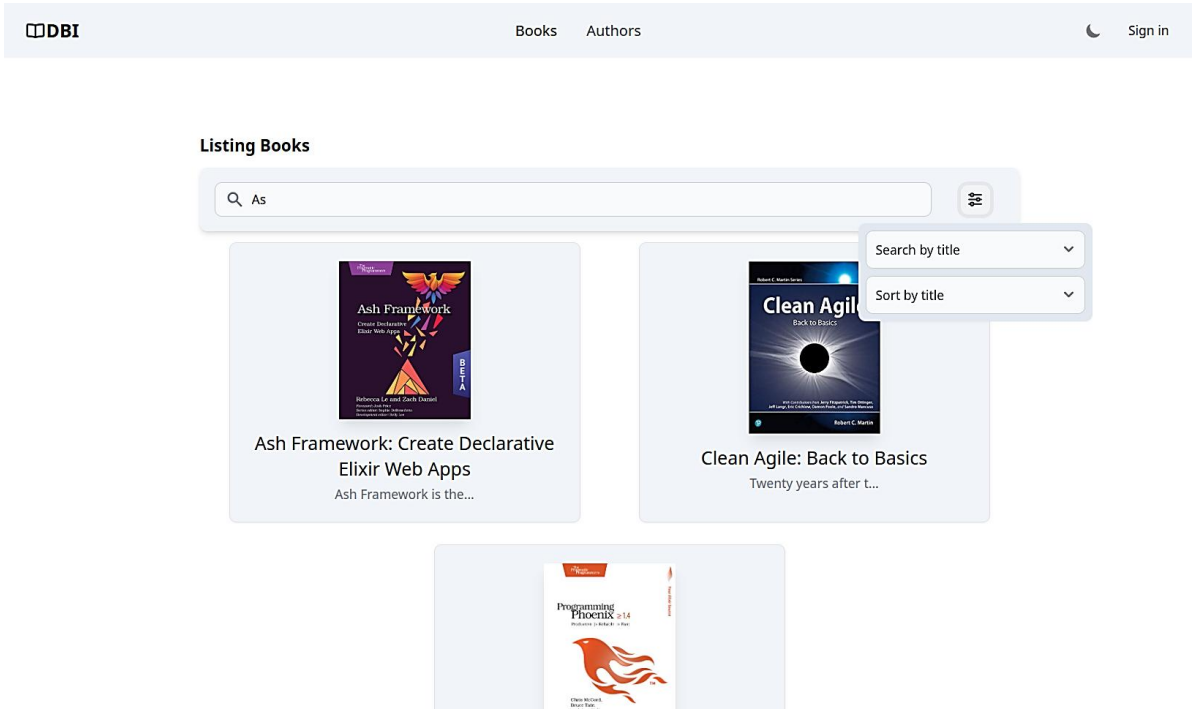


Рис. 3. Головна сторінка каталогу книг

Джерело: розроблено авторами.

Детально сторінка книги (рис. 4, 5) відображає повну структуру метаданих: назву, авторів з ролями участі, множинні ідентифікатори (ISBN-13, ISBN-10, ASIN), видавця та додаткові атрибути.

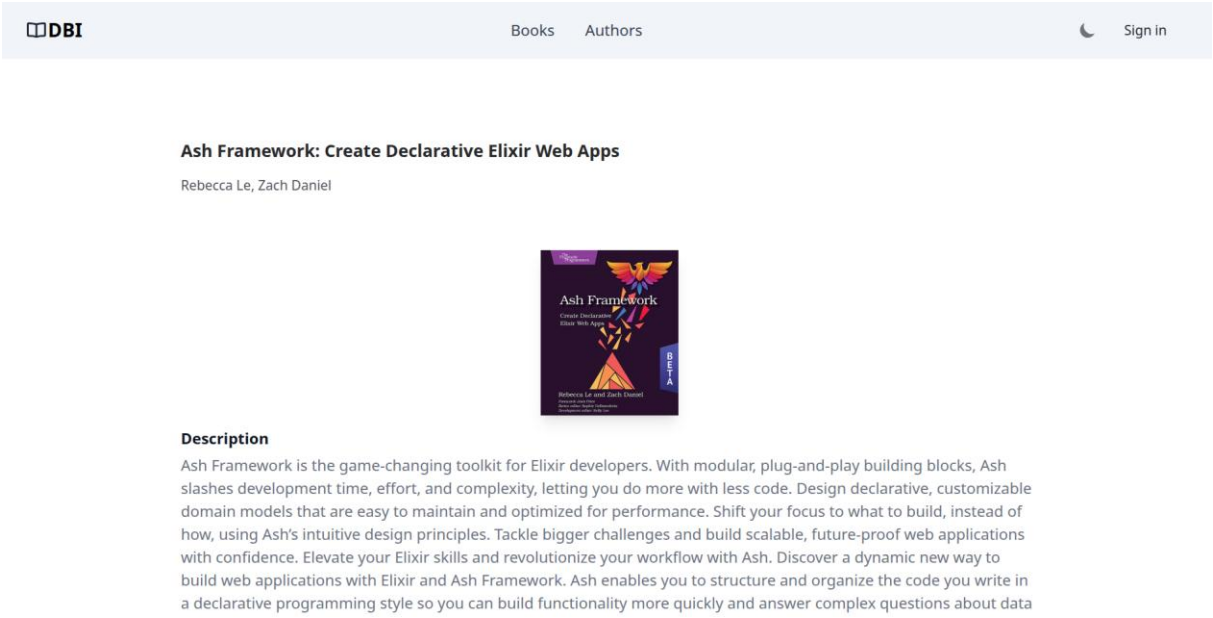


Рис. 4. Сторінка книги з метаданими та ідентифікаторами

Джерело: розроблено авторами.

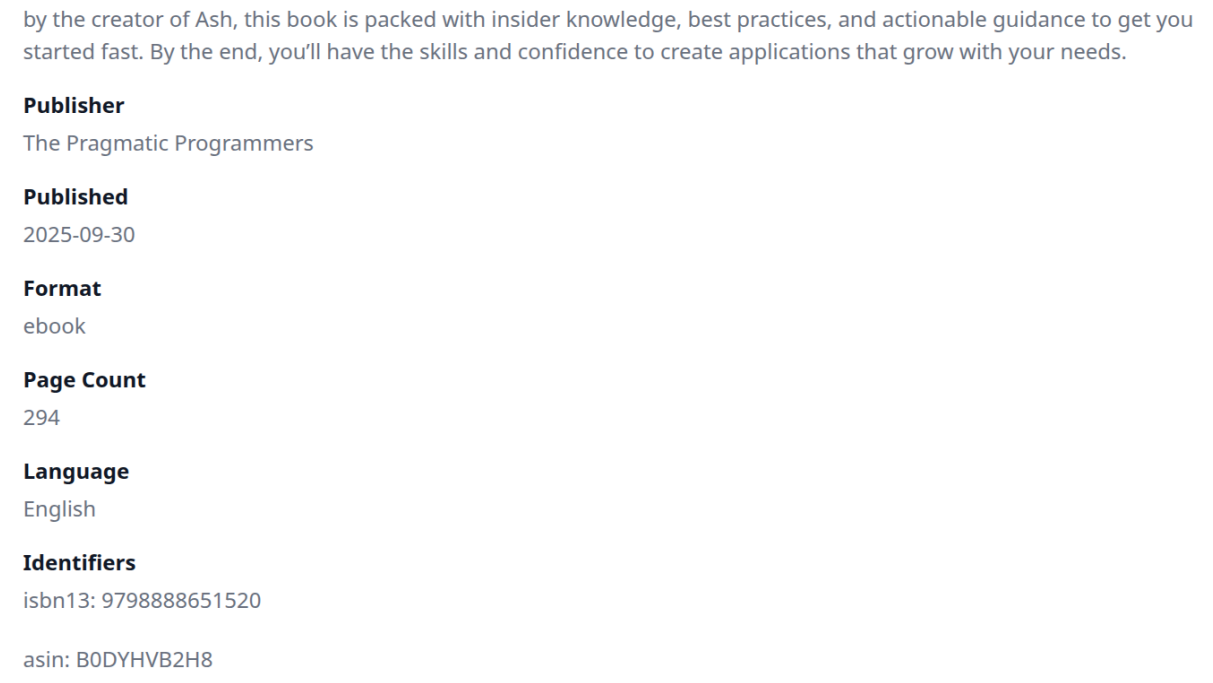


Рис. 5. Сторінка книги з метаданими та ідентифікаторами (продовження)

Джерело: розроблено авторами.

Для забезпечення прозорості інтеграцій API документовано через Swagger UI (рис. 6), що дозволяє розробникам сторонніх систем ознайомитися зі специфікацією endpoint-ів та тестувати запити безпосередньо у браузері.

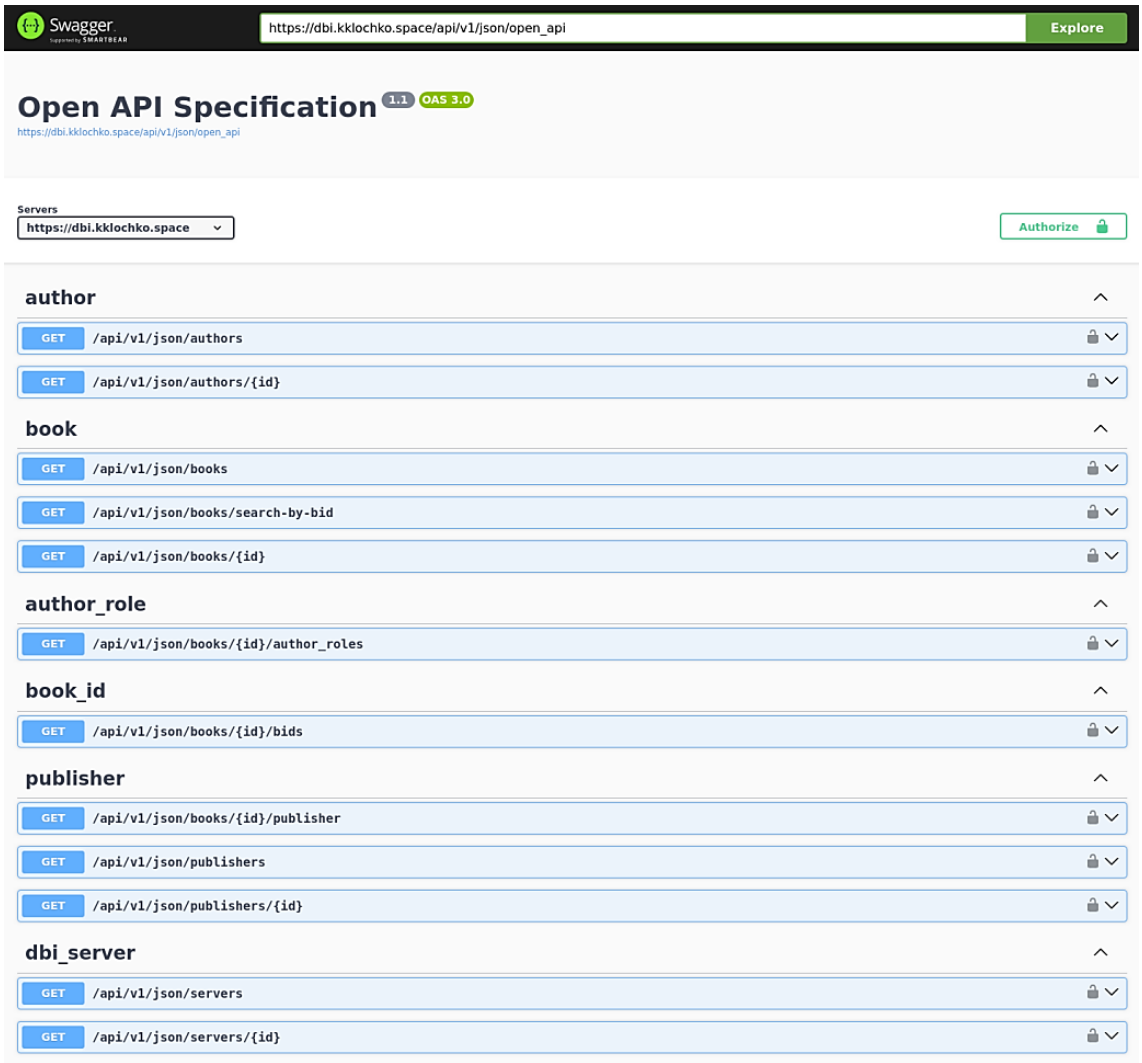


Рис. 6. Документація JSON API через Swagger UI

Джерело: розроблено авторами.

Обмеження дослідження та напрями подальшого розвитку

Поточне дослідження має архітектурно-проєктний характер і зосереджене на обґрунтуванні архітектури, реалізації прототипу системи та описі механізмів децентралізованої синхронізації й інтеграції через JSON API. На цьому етапі не проводилося повномасштабне експериментальне оцінювання продуктивності, відмовостійкості та якості зіставлення метаданих у федеративному середовищі, що є обмеженням роботи.

Разом із тим реалізований прототип і запропонована архітектура створюють основу для подальшого кількісного дослідження. Подальший розвиток роботи доцільно здійснювати за такими напрямами:

1. Експериментальне оцінювання продуктивності пошуку та синхронізації. Передбачається вимірювання часу відповіді пошукових запитів, затримки, тривалості циклу синхронізації, а також оцінка впливу кількості вузлів федерації та обсягу даних на продуктивність системи.

2. Дослідження відмовостійкості в умовах часткової недоступності вузлів федерації. Планується оцінити працездатність системи при недоступності частини серверів, частку успішних задач синхронізації, поведінку механізмів повторних спроб та вплив збоїв мережі на повноту локального кешу.

3. Розширення моделі даних і підтримки бібліографічних форматів. Перспективним є додавання механізмів імпорту/експорту у поширених бібліографічних форматах, розширення опису видань, а також підтримка додаткових типів ідентифікаторів для підвищення інтероперабельності.

4. Оцінювання практичної придатності системи в реальних сценаріях використання. Окремим напрямом є апробація системи в навчальних, дослідницьких або спільнотних середовищах з аналізом зручності використання, типових сценаріїв каталогізації та інтеграції з іншими сервісами.

5. Дослідження моделі довіри та безпеки федерації. Відкритим питанням залишається формалізація моделі довіри між вузлами: визначення критеріїв прийнятності вузла для участі у федерації, механізмів відкликання довіри та ізоляції скомпрометованого сервера без порушення роботи решти мережі. Перспективним є також дослідження застосування підписів метаданих (наприклад, на основі криптографічних ключів вузла) для верифікації автентичності та цілісності синхронізованих записів.

Отже, подальші дослідження мають бути спрямовані на кількісну валідацію запропонованих архітектурних рішень, поглиблення механізмів інтеграції та підвищення якості обробки метаданих у децентралізованому середовищі.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що запропоновано архітектуру децентралізованої системи каталогізації книжкових метаданих у формі модульного моноліту, яка поєднує реактивний вебінтерфейс, документований JSON API та механізми федеративної синхронізації. А також удосконалено підхід до федеративної синхронізації метаданих за рахунок поєднання локального кешування, стратегії «джерело істини» та фонової планової/ручної синхронізації, що зменшує залежність від доступності зовнішніх вузлів під час пошуку;

Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні працездатної інформаційної системи для децентралізованої каталогізації книжкових метаданих, реалізованої у формі вебзастосунку з рольовим доступом, публічним JSON API та підсистемою фонової синхронізації між серверами федерації. Запропоновані архітектурні рішення можуть бути використані у навчальних і університетських бібліотечних сервісах, у локальних книжкових спільнотах та тематичних каталогах, як основа для інтеграції з бібліографічними інструментами й сторонніми інформаційними системами, а також у навчальному процесі під час вивчення дисциплін з вебтехнологій, проєктування інформаційних систем та розподілених систем.

Висновки. У роботі запропоновано архітектуру децентралізованої системи каталогізації книжкових метаданих у формі вебзастосунку, що поєднує реактивний вебінтерфейс, документований JSON API та механізми федеративної синхронізації з локальним кешуванням даних. Запропонований підхід орієнтований на забезпечення балансу між автономністю вузлів федерації, продуктивністю пошуку та простотою інтеграції з іншими інформаційними системами.

Реалізацію системи виконано на основі технологічного стека Elixir/Phoenix/Ash/PostgreSQL із використанням Phoenix LiveView для реактивного інтерфейсу, PostgreSQL для транзакційного зберігання та індексованого пошуку, а також Oban для організації фонових задач синхронізації. Застосування модульного моноліту дозволило зберегти чітке розмежування доменних контекстів і підсистем інтеграції при нижчій операційній складності порівняно з мікросервісним підходом.

У межах запропонованої архітектури реалізовано рольову модель доступу (гість, користувач, модератор, адміністратор), яка забезпечує керованість змін метаданих та узгоджене застосування політик доступу у вебінтерфейсі й API. Для інтеграції з іншими сервісами реалізовано публічний read-only JSON API із документацією через OpenAPI (Swagger UI), що спрощує підключення зовнішніх клієнтів і вузлів федерації.

Ключовим архітектурним рішенням є використання локального кешування метаданих замість прямого проксіювання пошукових запитів до серверів федерації. Такий підхід зменшує залежність користувацьких сценаріїв від доступності зовнішніх вузлів, забезпечує стабільніший час відгуку пошуку та переносить витрати на інтеграцію і дедуплікацію у фоновий контур синхронізації. Для підвищення узгодженості даних у федеративному середовищі використано стратегію «джерело істини», глобально унікальні ідентифікатори UUID та множинні бібліографічні ідентифікатори для зіставлення записів.

На поточному етапі дослідження зосереджене на архітектурному обґрунтуванні та реалізації прототипу системи. Повномасштабне кількісне експериментальне оцінювання продуктивності, відмовостійкості та точності зіставлення метаданих визначено як наступний етап роботи. Така валідація дозволить формалізовано оцінити ефективність локального кешування у федеративному середовищі, порівняти запропонований підхід зі сценаріями прямого проксіювання та уточнити параметри подальшої оптимізації синхронізації.

Подальший розвиток системи доцільно спрямувати на експериментальну перевірку запропонованих рішень, розширення підтримки бібліографічних форматів, а також поглиблення інтеграцій із зовнішніми каталогами та сервісами.

Безпекова модель системи базується на явній реєстрації вузлів федерації, схемній валідації синхронізованих метаданих та обмеженні на редагування зовнішніх записів. Крім того, систему захисту можна покращити на базі моделі довіри між вузлами та реалізації механізмів захисту від шкідливих учасників федерації.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті

Під час написання цього матеріалу автор(и) використовували Claude (Anthropic) для перевірки граматичної правильності українського та англійського текстів, а також для поліпшення структури окремих речень. Також було використано NotebookLM (Google) для аналізу джерел дослідження. Після використання цих інструментів автор(и) переглянув(ли) та відредагував(ли) зміст за потреби і взяв(ли) на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Ash Framework. (n.d.). Ash HQ. https://ash-hq.org/.
2. Phoenix Framework. (n.d.). Phoenix Framework. https://www.phoenixframework.org/.
3. Tate, B., & DeBenedetto, S. (2025). *Programming Phoenix LiveView: Interactive Elixir web programming without writing any JavaScript*. The Pragmatic Bookshelf.
4. The Elixir programming language. (n.d.). *The Elixir programming language*. https://elixir-lang.org/.
5. PostgreSQL. (n.d.). *PostgreSQL*. https://www.postgresql.org/.
6. Docker: Accelerated container application development. (n.d.). Docker. https://www.docker.com/.
7. Nginx. (n.d.). nginx. https://nginx.org/en/.
8. Robust job processing. (n.d.). Oban Pro. https://oban.pro/.
9. Tailwind CSS - Rapidly build modern websites without ever leaving your HTML. (n.d.). Tailwind CSS. https://tailwindcss.com/.
10. Flowbite. (n.d.). Flowbite. https://flowbite.com/.

11.GitHub - bookwyrm-social/bookwyrm: Social reading and reviewing, decentralized with ActivityPub. (n.d.). GitHub. https://github.com/bookwyrm-social/bookwyrm.

12.GitHub - internetarchive/openlibrary: One webpage for every book ever published! (n.d.). GitHub. https://github.com/internetarchive/openlibrary.

13.Palmer, C. L., Zavalina, O. L., & Mustafoff, M. (2007). Trends in metadata practices: A longitudinal study of collection federation. In *Proceedings of the 7th ACM/IEEE-CS Joint Conference on Digital Libraries* (pp. 386–395). https://doi.org/10.1145/1255175.1255251.

14.Ordonez, C., Chen, Z., & García-García, J. (2007). Metadata management for federated databases. In *Proceedings of the 2007 ACM Workshop on CyberInfrastructure: Information Management in eScience* (pp. 47–54). https://doi.org/10.1145/1317353.1317361.

15.Tellvik, D. (2023). *Metadata decentralized: An examination of folksonomy in book publishing* [Master's thesis, Portland State University]. PDXScholar. https://pdxscholar.library.pdx.edu/eng_bookpubpaper/77/.

16.Palmer, C. L., & Knutson, E. M. (2004). Metadata practices and implications for federated collections. In *Proceedings of the 67th ASIS&T Annual Meeting* (Vol. 41, pp. 456–462). https://doi.org/10.1002/meet.1450410153.

References

1. Ash Framework. (n.d.). Ash HQ. https://ash-hq.org/.

2. Phoenix Framework. (n.d.). Phoenix Framework. https://www.phoenixframework.org/.

3. Tate, B., & DeBenedetto, S. (2025). *Programming Phoenix LiveView: Interactive Elixir web programming without writing any JavaScript*. The Pragmatic Bookshelf.

4. The Elixir programming language. (n.d.). *The Elixir programming language*. https://elixir-lang.org/.

5. PostgreSQL. (n.d.). *PostgreSQL*. https://www.postgresql.org/.

6. Docker: Accelerated container application development. (n.d.). Docker. https://www.docker.com/.

7. Nginx. (n.d.). nginx. https://nginx.org/en/.

8. Robust job processing. (n.d.). Oban Pro. https://oban.pro/.

9. Tailwind CSS - Rapidly build modern websites without ever leaving your HTML. (n.d.). Tailwind CSS. https://tailwindcss.com/.

10.Flowbite. (n.d.). Flowbite. https://flowbite.com/.

11.GitHub - bookwyrm-social/bookwyrm: Social reading and reviewing, decentralized with ActivityPub. (n.d.). GitHub. https://github.com/bookwyrm-social/bookwyrm.

12.GitHub - internetarchive/openlibrary: One webpage for every book ever published! (n.d.). GitHub. https://github.com/internetarchive/openlibrary.

13.Palmer, C. L., Zavalina, O. L., & Mustafoff, M. (2007). Trends in metadata practices: A longitudinal study of collection federation. In *Proceedings of the 7th ACM/IEEE-CS Joint Conference on Digital Libraries* (pp. 386–395). https://doi.org/10.1145/1255175.1255251.

14.Ordonez, C., Chen, Z., & García-García, J. (2007). Metadata management for federated databases. In *Proceedings of the 2007 ACM Workshop on CyberInfrastructure: Information Management in eScience* (pp. 47–54). https://doi.org/10.1145/1317353.1317361.

15.Tellvik, D. (2023). *Metadata decentralized: An examination of folksonomy in book publishing* [Master's thesis, Portland State University]. PDXScholar. https://pdxscholar.library.pdx.edu/eng_bookpubpaper/77/.

16.Palmer, C. L., & Knutson, E. M. (2004). Metadata practices and implications for federated collections. In *Proceedings of the 67th ASIS&T Annual Meeting* (Vol. 41, pp. 456–462). https://doi.org/10.1002/meet.1450410153.

Дата першого надходження статті до видання: 18.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 06.01.2026

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

UDC 004.75

Andrii Rohovenko [1], Kostiantyn Klochko [2], Artem Mylytsia[3]

[1] PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Information and Computer Systems
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: arogovenko@stu.cn.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-4594-5692
ResearcherID: G-3926-2014. **Scopus Author ID:** 57484900000.

[2] Master's student, Department of Information and Computer Systems
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: kostya_klochko@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0003-8555-8723.

[3] Senior Lecturer, Department of Information and Computer Systems
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: artemmylytsia@stu.cn.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0003-5026-0601.

ARCHITECTURE OF A DECENTRALIZED BOOK METADATA CATALOGING SYSTEM WITH JSON API AND FEDERATED SYNCHRONIZATION

This paper proposes an architecture of a decentralized book metadata cataloging system designed for metadata management and integration with external information services through a JSON API. The relevance of the study is determined by the limitations of centralized cataloging platforms, where metadata moderation and updates are often concentrated within a small group of contributors, resulting in delays, incomplete records, and reduced interoperability with third-party systems.

The study analyzes approaches to metadata federation, interoperability, and the social decentralization of metadata creation in cataloging systems. Particular attention is paid to the challenges of combining heterogeneous metadata sources, preserving contextual information during federation, and supporting flexible metadata enrichment practices. Based on this analysis, the paper identifies practical requirements for a decentralized cataloging solution.

The developed system is implemented as a web application with role-based access control (guest, user, moderator, and administrator). It supports viewing and editing data about books, authors, and publishers, and provides a documented JSON API using an OpenAPI (Swagger UI) specification. The architectural foundation of the system is a modular monolith with client-server interaction, a local metadata store, and a background synchronization subsystem for communication with other federation nodes. This architectural choice preserves modular separation of concerns while reducing operational complexity compared to microservice-based deployments, which is especially important for small development teams and educational or research infrastructures.

Decentralization is achieved through local caching of data retrieved from federation servers and scheduled/manual synchronization. This strategy reduces the number of remote requests during user search operations, improves data availability when some federation nodes are temporarily unavailable, and provides more stable response times for search queries. To maintain data consistency in a federated environment, the system applies a "source of truth" strategy, globally unique UUID identifiers, and multiple bibliographic identifiers (ISBN-10, ISBN-13, ASIN) for record matching and deduplication. In addition, synchronized records obtained from external nodes are treated as non-editable on the local node, which reduces the risk of version conflicts and preserves source provenance.

The proposed approach combines federation node autonomy, practical search performance requirements, and ease of integration with external systems, making it suitable for educational, research, and community-based cataloging services. The study has an architectural and design-oriented character and provides a basis for future quantitative evaluation of system performance, synchronization efficiency, fault tolerance, and metadata matching accuracy in a federated environment.

Keywords: *decentralisation; book cataloging; metadata; server federation; web application; JSON API; synchronisation; Elixir; Ash; Phoenix; PostgreSQL.*

Fig.: 4. Table: 1. References: 16.

Роговенко А. І., Клочко К. М., Милиця А. Ю. Архітектура децентралізованої системи каталогізації книжкових метаданих із JSON API та федеративною синхронізацією. *Технічні науки та технології*, 2026. № 1(43). С. 114-127. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-114-127.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-128-140
УДК 681.518:004.93

Микита Костянтинович Супруненко[1], Микита Ігорович Мироненко[2], Іван Володимирович Павленко[3], Дмитро Вікторович Прилепа[4]

[1]доктор філософії, асистент кафедри технічного сервісу та галузевого машинобудування, Сумський національний аграрний університет (Суми, Україна)
E-mail: mykyta.suprunenko@cs.sumdu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0001-8342-3003

[2]доктор філософії, асистент кафедри комп'ютерних наук, Сумський державний університет (Суми, Україна)
E-mail: m.myronenko@cs.sumdu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-5005-1672

[3]доктор технічних наук, професор, старший дослідник, професор кафедри комп'ютерної механіки імені Володимира Марциновського, Сумський державний університет (Суми, Україна)
E-mail: i.pavlenko@cm.sumdu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-6136-1040

[4]доктор філософії, старший викладач кафедри комп'ютерних наук, Сумський державний університет (Суми, Україна)
E-mail: d.prylepa@cs.sumdu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-4022-5496

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ СИСТЕМИ РОЗПІЗНАВАННЯ ЕЛЕКТРОМІОГРАФІЧНИХ СИГНАЛІВ

Запропоновано метод інформаційно-екстремального машинного навчання системи розпізнавання електроміографічних сигналів неінвазивного протеза, які реєструють електричну активність м'язів руки при когнітивних командах на виконання неінвазивним протезом відповідних жестів кісті руки. Метод забезпечує необхідну умову досягнення високої точності глибокого машинного навчання шляхом максимізації середньої міжкласової кодової відстані. У результаті застосування інформаційно-екстремального машинного навчання третього рівня глибини побудовано високодостовірні вирішувальні правила для розпізнавання нечітких електроміографічних сигналів на виконання жестів середнього та безіменного пальців руки.

Ключові слова: *електроміографічний сигнал; інформаційно-екстремальне машинне навчання; інформаційний критерій; оптимізація параметрів машинного навчання; протез кисті.*
Рис. 4. Бібл.: 19.

Актуальність теми дослідження. Актуальність теми дослідження обумовлена зростаючими вимогами до функціональних можливостей сучасних біонічних протезів, які повинні забезпечувати природність, плавність та високу точність відтворення рухів пальців кисті руки в реальному часі. Попри наявність широкого спектра комп'ютерно-інтегрованих електроміографічних-сенсорів із функціями фільтрації й нормалізації сигналів, все ще відсутні інтелектуальні протези кісті руки з високими експлуатаційними характеристиками. Перспективним напрямом удосконалення таких протезів є підвищення функціональної ефективності системи розпізнавання електроміографічних сигналів (ЕМГ-сигналів) на основі методів машинного навчання, здатних моделювати у рамках функціонального підходу механізм прийняття класифікаційних рішень природним інтелектом. Водночас необхідно подолати методологічні ускладнення, обумовлені перетином класів розпізнавання у просторі ознак, що робить підвищення функціональної ефективності систем розпізнавання ЕМГ-сигналів у протезуванні актуальною задачею.

Мета дослідження. Метою дослідження є підвищення точності розпізнавання ЕМГ-сигналів з високим ступенем перетину класів розпізнавання в просторі ознак шляхом інформаційно-екстремального машинного навчання, яке моделює механізм прийняття рішень природним інтелектом.

Постановка проблеми. Дослідження спрямовано на вирішення проблеми підвищення функціональної ефективності неінвазивного протеза кисті руки, основними складовими якої є точність і оперативність виконання когнітивних команд користувача протеза.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Електричні біоімпульси, які характеризують реакцію волокон м'язів руки на когнітивні команди, використовуються в інвазивних [1–3] та неінвазивних [4, 5] протезах. На відміну від інвазивного протеза, який потребує хірургічного втручання для імплантації ЕМГ-сенсорів, неінвазивний протез

© М. К. Супруненко, М. І. Мироненко, І. В. Павленко, Д. В. Прилепа, 2026

реєструє біоімпульси безпосередньо з волокон м'язів руки. При цьому ЕМГ-сигнал у порівнянні з інвазивним методом є більш зашумленим, що ускладнює його розпізнавання. Особливо складним є розпізнавання біоімпульсів, які характеризують жести пальців руки, оскільки вони використовують спільні групи м'язів і тому мають незначні відмінності. Для підвищення точності виконання когнітивних команд застосовуються тактильні сенсори [6, 7], основним недоліком яких є зменшення оперативності виконання жестів через збільшення перехідних процесів у механічній частині системі керування протезом. У праці [8] запропоновано підвищувати точність виконання когнітивних команд шляхом додаткової системи оптичного трекінгу руху очей, але такий підхід суттєво підвищує собівартість протеза та ускладнює умови його використання. У працях [9–11] розглядається використання для розпізнавання ЕМГ-сигналів популярних і доступних штучних нейронних мереж. Проте для досягнення високої точності нейроподібних структур необхідна велика кількість персоналізованих навчальних зразків, що суттєво збільшує тривалість машинного навчання. Крім того, як відмічають автори праць [12–14], у яких використовувалися штучні нейронні мережі, точність машинного навчання системи розпізнавання ЕМГ-сигналів жестів пальців руки все ще залишається незадовільною через суттєве перекриття їх класів розпізнавання у просторі ознак. Використання методу опорних векторів (SVM) [15], орієнтованого на чіткі класи розпізнавання, у випадку розпізнавання жестів пальців руки також не дозволяє досягнути прийнятних результатів. У випадку нечітких даних основним недоліком як штучних нейронних мереж, так і методу опорних векторів є необхідність попереднього налаштування експертом процедури екстракції специфічних даних необхідних для роботи обраного методу машинного навчання. Тобто всі ці методи потребують наявності розмічених даних. У працях [16,17] для розпізнавання ЕМГ-сигналів розглядаються методи машинного навчання в рамках інформаційно-екстремальної інтелектуальної технології (IEI-технології) аналізу даних. Методи інформаційно-екстремального машинного навчання розробляються в рамках функціонального біонічного підходу до моделювання прийняття класифікаційних рішень природним інтелектом. На відміну від штучних нейронних мереж цей підхід характеризується високою гнучкістю, інтерпретованістю та уніфікованістю.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Незважаючи на стрімкий розвиток методів інформаційно-екстремального машинного навчання як перспективної альтернативи штучним нейронним мережам залишається малодослідженим вплив на точність класифікаційних рішень рівня селекції ознак усереднених реалізацій класів розпізнавання. При цьому оптимізація (тут і далі в тексті в інформаційному розумінні) рівня селекції дозволяє максимізувати середню міжкласову відстань для заданої абетки класів розпізнавання, що створює необхідну умову досягнення високої точності машинного навчання. У статті розглянуто метод інформаційно-екстремального машинного навчання системи розпізнавання ЕМГ-сигналів двох найближчих сусідніх класів розпізнавання, які характеризують однакові жести середнього та безіменного пальців руки.

Постановка задачі. Розглянемо в рамках IEI-технології формалізовану постановку задачі глибокого інформаційно-екстремального машинного навчання системи розпізнавання ЕМГ-сигналів неінвазивного протеза кисті руки. Згідно з принципом найближчих сусідів нехай абетка $\{X_m^o \mid m=\overline{1,2}\}$ складається з двох близьких класів розпізнавання, які характеризують ЕМГ-сигнали на виконання протезом однакових жестів середнього і безіменного пальців руки. Такі класи розпізнавання суттєво перетинаються в просторі ознак, оскільки їх біоімпульси згенеровано спільною групою м'язів руки. Для заданих класів розпізнавання сформовано тривимірну вхідну навчальну матрицю $Y^{|2|}=\| y_{m,i}^{(j)} \mid i=\overline{1,N};\ j=\overline{1,n} \|$ типу «об'єкт-властивість», де N, – кількість ознак розпізнавання; n – кількість реалізацій

класів розпізнавання. Згідно з концепцією IEI-технології для кожного класу розпізнавання задано вектор параметрів машинного навчання, який, наприклад, для класу розпізнавання X_m^o має структуру

$$g_m =< d_m, \delta, .\rho >, \quad (1)$$

де d_m – радіус гіперсферичного контейнера класу розпізнавання X_m^o, який у процесі машинного навчання відновлюється в радіальному базисі Геммінгового простору ознак розпізнавання; δ – параметр, який дорівнює половині симетричного поля контрольних допусків на ознаки розпізнавання; ρ – рівень селекції ознак двійкових усереднених реалізацій класів розпізнавання.

Під рівнем селекції ознак усереднених двійкових реалізацій класів розпізнавання розуміється рівень квантування дискрет полігону частот потрапляння значень ознак розпізнавання у свої поля контрольних допусків. При побудові полігону частот на осі абсцис відкладаються ранги ознак в реалізаціях класів розпізнавання, а на осі ординат – частоти потрапляння значень ознак розпізнавання у свої поля контрольних допусків. На практиці за замовчуванням приймається рівень селекції ρ= 0,5. У цьому випадку ознака усередненої двійкової реалізації. яка визначає в просторі ознак геометричний центр класу розпізнавання, дорівнює одиниці, якщо кількість одиниць у її навчальній вибірці більше кількості нулів.

Оптимізація рівнів селекції в межах IEI-технології дозволяє розв'язувати дві важливі для підвищення точності машинного навчання задачі:

1. Наближення обчислених в процесі інформаційно-екстремального машинного навчання усереднених реалізацій класів розпізнавання до їх емпіричних центрів класів розпізнавання.

2. Реалізація максимально дистанційного принципу теорії розпізнавання образів шляхом максимізації у процесі інформаційно-екстремального машинного навчання середньої міжкласової кодової відстані для заданої абетки класів розпізнавання.

Область значень радіусів, наприклад, контейнера класу розпізнавання X_m^o задається нерівністю $d_m < d(x_m \oplus x_c)$, де $d(x_m \oplus x_c)$ –кодова відстань між усередненими двійковими реалізаціями найближчих сусідніх класів розпізнавання X_m^o і X_c^o.

Областю значень параметра δ є інтервал $[0; \delta_H / 2]$, де δ_H – нормоване поле допусків, яке задає область значень контрольного поля допусків.

Областю значень рівня селекції є інтервал $[0; 1]$.

У процесі інформаційно-екстремального машинного навчання необхідно:

1) Оптимізувати параметри машинного навчання (1), які забезпечують максимальне значення усередненого за абеткою класів розпізнавання інформаційного критерію в робочій (допустимій) області визначення його функції:

$$\overline{E}^* = \frac{1}{2}\sum_{m=1}^{2} \max_{G_E \cap G_d} E_m(d), \quad (2)$$

де $E_m(d)$ – інформаційний критерій оптимізації параметрів машинного навчання, який обчислюється при поточному радіусі d гіперсферичного контейнера класу розпізнавання X_m^o; G_E – робоча (допустима) область визначення функції інформаційного критерію, в якій перша і друга достовірності класифікаційних рішень перевершують відповідно помилки першого та другого роду; G_d – допустима область значень радіусів контейнера класу розпізнавання.

2) За отриманими в процесі машинного навчання оптимальними геометричними параметрами контейнерів класів розпізнавання побудувати високодостовірні вирішувальні правила, точність яких перевірити в режимі крос-валідації.

Таким чином, інформаційний синтез здатної навчатися системи розпізнавання ЕМГ-біосигналів здійснюється шляхом оптимізації в процесі інформаційно-екстремального машинного навчання параметрів функціонування (1) за інформаційним критерієм (2).

Виклад основного матеріалу. Функціональну категорійну модель (ФКМ) інформаційно-екстремального машинного навчання системи розпізнавання ЕМГ-сигналів представимо у вигляді спрямованого графу, ребрами якого є оператори відображення задіяних у процесі машинного навчання множин одна на одну. Вхідний математичний опис ФКМ представимо у вигляді структури

$$I_{ent} = < W, T, \Omega, Z; Y_f^{|2|}, Y^{|2|}, X^{|2|}; g_1, g_2, g_3 > ,$$

де W – множина факторів, які впливають на систему розпізнавання ЕМГ-сигналів під час машинного навчання; $\boldsymbol{T}$ – множина моментів часу зняття інформації з ЕМГ-сенсорів; $\boldsymbol{\Omega}$ – простір ознак розпізнавання; Z – абетка класів розпізнавання; $Y_f^{|2|}$ – множина відфільтрованих біосигналів, кардинальне число якої дорівнює 2; $Y^{|2|}$ – вхідна навчальна матриця, сформована в Евклідовому просторі ознак розпізнавання; $X^{|2|}$ –сформована в просторі Геммінга робоча бінарна навчальна матриця; g_1 – оператор фільтрації біосигналів, отриманих з джерела інформації, яке представляється у вигляді декартового добутку $W \times T \times \Omega \times Z$; g_2 – оператор формування вхідної навчальної матриці $Y^{|2|}$; g_3 – оператор формування робочої навчальної матриці $X^{|2|}$ шляхом інтервального кодування ознак розпізнавання навчальної матриці $Y^{|2|}$.

На рис. 1 представлено ФКМ інформаційно-екстремального машинного навчання системи розпізнавання ЕМГ-сигналів третього рівня глибини, на якому оптимізується рівень селекції ознак усереднених двійкових реалізацій класів розпізнавання.

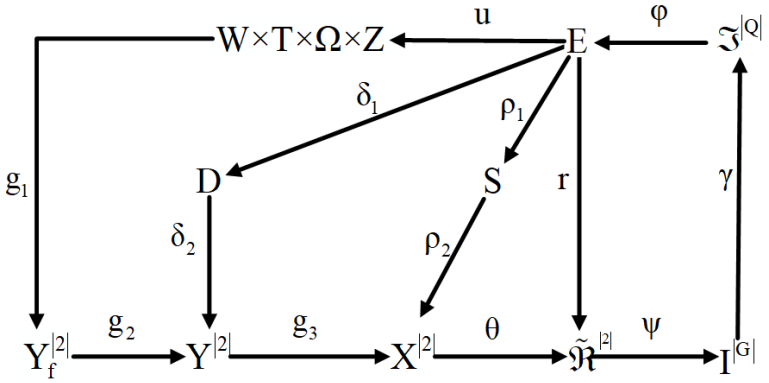


Рис. 1. Функціональна категорійна модель інформаційно-екстремального машинного навчання третього рівня глибини

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 1 загальною для всіх контурів оптимізації параметрів машинного навчання є терм-множина E, елементами якої є значення інформаційного критерію, обчислені на кожному кроці машинного навчання. Оператор $r: E \to \tilde{\Re}^{|M|}$ в процесі машинного навчання відновлює в радіальному базисі бінарного простору ознак контейнери класів розпізнавання, які утворюють у загальному випадку нечітке розбиття $\tilde{\Re}^{|M|}$. Оператор θ відображає двійкові реалізації класів розпізнавання на розбиття $\tilde{\Re}^{|M|}$. Далі оператор

$\psi : \widetilde{\Re}^{|M|} \to I^{|G|}$ де $I^{|G|}$ – множина гіпотез, перевіряє основну статистичну гіпотезу $\gamma_1 : x \in X_m^o$. Оператор γ визначає множину точнісних характеристик $\Im^{|Q|}$, де $Q = G^2$, а оператор φ обчисляє множину значень інформаційного критерію E, який є функціоналом від точнісних характеристик. Контур оптимізації контрольних допусків замикається через терм-множину D, елементами якої є значення контрольних допусків на ознаки розпізнавання. Крім того, показана на рисунку ФКМ має контур оптимізації, який замикається через терм-множину *S* значень рівнів селекції ознак двійкових усереднених реалізацій класів розпізнавання. Водночас оператор ρ_1 визначає на кожному кроці машинного навчання значення рівня селекції, а оператор ρ_2 задає рівень квантування ознак робочої бінарної навчальної матриці $X^{|M|}$. Оператор *u* регламентує процес машинного навчання.

Показану на рисунку 1 ФКМ можна розглядати як графічну структуру алгоритму інформаційно-екстремального машинного навчання системи розпізнавання ЕМГ-сигналів третього рівня глибини. Водночас згідно з концепцією IEI-технології спочатку реалізується так званий базовий алгоритм, призначенням якого є формування робочої навчальної матриці $X^{|M|}$ шляхом інтервального кодування ознак розпізнавання вхідної навчальної матриці $Y^{|M|}$. При цьому рівнями квантування є відповідні нижні та верхні контрольні допуски на ознаки розпізнавання вхідної навчальної матриці.

Базовий алгоритм інформаційно-екстремального машинного навчання другого рівня глибини представимо у вигляді двохциклічної ітераційної процедури пошуку глобального максимуму інформаційного критерію (2) в робочій області визначення його функції:

$$\delta^* = \arg \max_{G_\delta} \{ \max_{G_E \cap G_d} \overline{E}(d) \}, \quad (3)$$

де $\overline{E}(d)$ – значення усередненого інформаційного критерію оптимізації, обчислене при поточному радіусі *d* контейнерів класів розпізнавання; G_δ – область допустимих значень параметра поля контрольних допусків на ознаки розпізнавання.

Внутрішній цикл процедури (3) реалізує алгоритм першого рівня глибини. який на кожному кроці машинного навчання обчислює критерій (2), здійснює пошук глобального максимуму критерію і відповідно оптимального радіусу гіперсферичного контейнера класу розпізнавання. Алгоритм інформаційно-екстремального машинного навчання першого рівня глибини реалізується у вигляді ітераційної процедури оптимізації радіуса d_m контейнера класу розпізнавання X_m^o за інформаційним критерієм:

$$d_m^* = \arg \max_{G_E \cap G_m^d} E_m(d), \quad (4)$$

де G_m^d – допустима область значень радіусів гіперсфеичного контейнера класу розпізнавання X_m^o.

Вхідною інформацією алгоритму інформаційно-екстремального машинного навчання першого рівня глибини є тривимірний масив $\{y_{m,i}^{(j)} \mid m = \overline{1,M}; i = \overline{1,N}; j = \overline{1,n}\}$ реалізацій вхідної навчальної матриці класів розпізнавання; значення параметра поля контрольних допусків δ на ознаки розпізнавання і рівень селекції ρ координат усереднених двійкових векторів ознак класів розпізнавання, який за замовчуванням дорівнює 0,5.

Як допусковий приймаємо клас розпізнавання X_1^o, відносно якого задається система контрольних допусків на ознаки розпізнавання, і розглянемо основні етапи реалізації алгоритму:

1. Обнуління лічильника класів розпізнавання: $m := 0$.

2. Ініціалізація лічильника класів розпізнавання: $m := m + 1$.

3. Обчислення усередненої реалізації y_1 вхідної навчальної матриці класу розпізнавання X_1^o.

4. Обчислення для кожної i-ї ознаки усередненої реалізації y_1 нижнього A_{HKi} і верхнього A_{BKi} контрольних допусків на ознаки розпізнавання за формулами:

$$A_{HK,i} = y_{1,i} - \delta\,;\, A_{BK,i} = y_{1,i} + \delta\,, \tag{5}$$

де $y_{1,i}$ – i-та ознака усередненої реалізації y_1 навчальної матриці допускового класу розпізнавання X_1^o.

5. Формування тривимірного масиву $\{x_{m,i}^{(j)}\}$ робочої бінарної навчальної матриці для класу розпізнавання X_m^o, елементи якої визначаються за правилом

$$x_{m,i}^{(j)} = \begin{cases} 1, & \text{if} \quad A_{HK,i} \le y_{m,i}^{(j)} \le A_{BK,i} \\ 0, & \text{if} \quad \text{else}\,, \end{cases};$$

де $y_{m,i}^{(j)}$ – i-та ознака вхідної навчальної матриці;

6. Обчислення усередненої двійкової реалізацій x_m робочої навчальної матриці, елементи якої визначаються за правилом

$$x_{m,i} = \begin{cases} 1, & if \quad \dfrac{1}{n}\sum\limits_{j=1}^{J\max} x_{m,i}^{(j)} > \rho_m; \\ 0, & if \quad else; \end{cases}$$

де ρ_m – рівень селекції ознак двійкової реалізації класу розпізнавання X_m^o, який за замовчуванням дорівнює 0,5.

7. Якщо $m < M$, то виконується пункт 2, інакше – пункт 8.

8. Обнуління лічильника класів розпізнавання: $m := 0$.

9. Ініціалізація лічильника класів розпізнавання: $m := m + 1$.

10. Обнуління лічильника кроків зміни радіуса контейнера класу розпізнавання X_m^o: $d_m := 0$.

11. Ініціалізація лічильника кроків зміни радіуса контейнера: $d_m := d_m + 1$.

12. Обчислення інформаційного критерію оптимізації параметрів машинного навчання.

13. Якщо $d_m < d(x_m \oplus x_c)$, де x_c – усереднена реалізація сусіднього класу розпізнавання X_c^o, то виконується пункт 12, інакше – пункт 15.

14. Визначається максимальне значення інформаційного критерію в робочій області визначення його функції та екстремальне значення радіуса d_m^*, яке приймається за оптимальне в інформаційному розумінні.

15. Якщо $m \le M$, то виконується пункт 9, інакше – пункт 16.

16. ЗУПИНКА.

Для реалізації базового алгоритму додатково задається нормоване поле δ_H допусків на ознаки розпізнавання. Тоді алгоритм інформаційно-екстремального машинного навчання полягає в зміні на кожному кроці ітераційної процедури (3) параметра δ поля контрольних допусків на ознаки розпізнавання в межах допустимої області його значень.

Оптимальне значення параметра δ визначається як екстремальне значення глобального максимуму усередненого для двох класів розпізнавання інформаційного критерію (2). Якщо за результатами реалізації базового алгоритму максимальне значення інформаційного критерію (2) є недостатньо високими, то згідно з принципом відкладених рішень необхідно збільшити глибину машинного навчання. У нашому випадку алгоритм інформаційно-екстремального машинного навчання третього рівня глибини з оптимізацією рівня селекції ознак двійкових усереднених реалізацій класів розпізнавання реалізується за ітераційною процедурою

$$\rho^* = \arg\max_{G_\rho}\{\max_{\delta^*}\{\max_{G_E \cap G_d} \overline{E}(d)\}, \quad (6)$$

де G_ρ – допустима область визначення рівня селекції ρ; δ^* – оптимальний параметр поля контрольних допусків, отриманий у результаті реалізації базового алгоритму.

Реалізація процедури (6) здійснюється шляхом зміни в зовнішньому циклі рівня селекції ρ в інтервалі [0;1]. При цьому алгоритм (6) належить до класу так званих жадібних алгоритмів, оскільки машинне навчання першого рівня глибини реалізується для всіх значень рівня селекції при незмінному оптимальному параметрі δ поля контрольних допусків.

Як критерій оптимізації параметрів машинного навчання розглядалася модифікована авторами інформаційна міра Кульбака у вигляді

$$E_m(d) = \frac{1}{n}\{K_1(d) - K_2(d)\}\log_2\left\{\frac{n + K_1(d) - K_2(d) + 1/n}{n - K_1(d) + K_2(d) + 1/n}\right\}, \quad (7)$$

де $K_1(d)$ – кількість реалізацій класу розпізнавання X_m^o, які правильно класифіковано при поточному радіусі контейнера; $K_2(d)$ – кількість помилково віднесених до класу розпізнавання X_m^o реалізацій іншого класу розпізнавання; $1/n$ – достатньо мале число для усунення поділу на нуль.

Нормована форма інформаційного критерію представляється як відношення критерію (6) до його максимального значення, яке він приймає при значеннях $K_1(d) = n$ і $K_2(d) = 0$.

У методах інформаційно-екстремального машинного навчання вирішувальні правила будуються за оптимальними геометричними параметрами контейнерів класів розпізнавання і представляються для гіперсферичного класифікатора у вигляді

$$(\forall X^o_{m,s,h} \in \Re^{|2|}_{s,h})(\forall x_t \in \Re^{|2|}_{s,h})\left[\begin{array}{l} if\,[(\mu_m > 0)\,\&\,(\mu_{m,s,h} = \max\limits_{\{m_s\}}\{\mu_{ms,h}\})]\,then \\ x_t \in X^o_{m,s,h}\ else\ x_e \notin X^o_{m,s,h} \end{array}\right], \quad (8)$$

де x_t –тестова реалізація, що розпізнається; μ_m – функція належності реалізації x_t до класу розпізнавання X_m^o.

У виразі (8) функція належності μ_m має вигляд

$$\mu_m = 1 - \frac{d(x_t \oplus x_m^*)}{d_m^*}, \quad (9)$$

де $d(x_t \oplus x_m^*)$ – кодова відстань Геммінга між тестовою реалізацією x_t і оптимальною усередненою реалізацією x_m^* класу розпізнавання X_m^o; d_m^* – оптимальний радіус контейнера класу розпізнавання X_m^o.

Вирішувальні правила (8), побудовані в межах геометричного підходу, відзначаються високою оперативністю класифікації, що є критично важливим для виконання когнітивних команд протеза.

Результати. Машинне навчання системи розпізнавання ЕМГ-сигналів здійснювалося для виконання протезом кисті руки двох жестів: щипок середнього і великого пальців (клас розпізнавання X_1^o) і щипок безіменного і великого пальців (клас розпізнавання X_2^o). Вхідна навчальна матриця формувалася з відкритих джерел, в яких надавалися реалізації ЕМГ-сигналів [17]. Особливість обраних ЕМГ-сигналів полягала в тому, що вони характеризувалися найбільшою близькістю в порівнянні з біосигналами інших жестів пальців руки. Кожна реалізація ЕМГ-сигналу складалася з 2400 ознак розпізнавання, які вимірялися на часовому інтервалі 3 секунди.

На рисунку 2 показано графік залежності усередненого нормованого інформаційного критерію (7) від параметра δ поля контрольних допусків на ознаки розпізнавання, отриманий за результатами реалізації базового алгоритму. На рисунку і далі в тексті ділянка, позначена подвійним штрихуванням, є робочою областю визначення функції інформаційного критерію (7), в якій перша достовірність понад 0,5, а помилка другого роду відповідно менше.

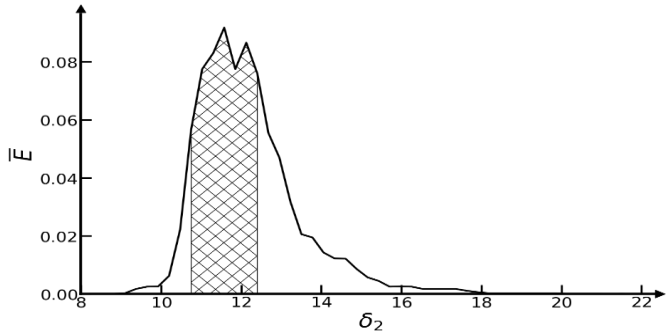


Рис. 2. Залежність інформаційного критерію від параметру поля контрольних допусків на ознаки розпізнавання

Джерело: розроблено авторами.

Аналіз рис. 2 показує, що наявність робочої області визначення функції критерію (7) свідчить про досягнення в процесі машинного навчання подільності класів розпізнавання, але максимальне значення критерію є низьким. Для підвищення точності машинного навчання було збільшено рівень його глибини, на якому оптимізувався рівень селекції ознак усереднених двійкових реалізацій класів розпізнавання.

На рис. 3 представлено графік залежності усередненого нормованого критерію (7) від рівня селекції ознак двійкових реалізацій класів розпізнавання X_1^o і X_2^o, отриманий у процесі машинного навчання за процедурою (6).

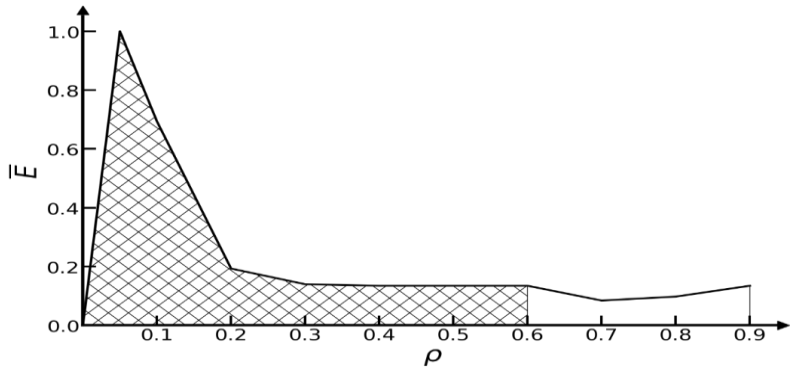
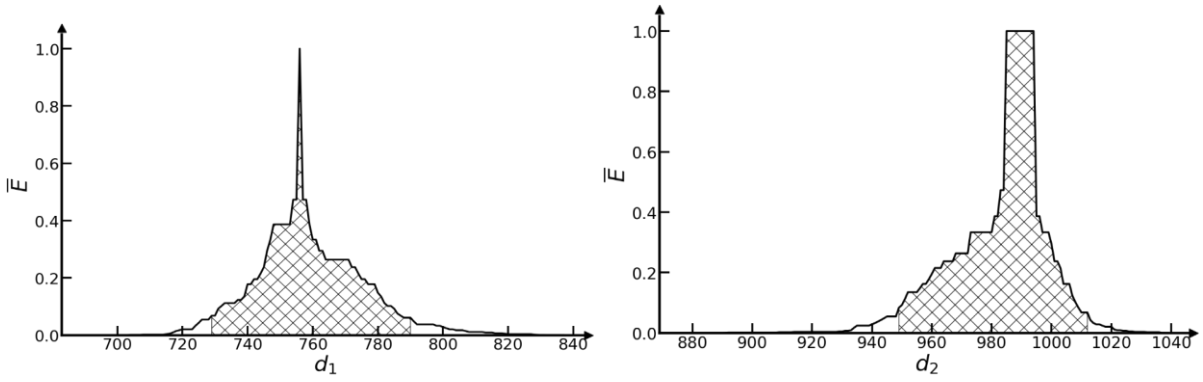


Рис. 3. Залежність нормованого критерію (7) від рівня селекції ознак двійкових реалізацій класів розпізнавання

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 4 представлено графіки залежності нормованого інформаційного критерію (7) від радіусів контейнерів класів розпізнавання, отримані при оптимальних параметрах машинного навчання δ^* і ρ^*.



а б

Рис. 4. Графіки залежності інформаційного критерію від радіусів контейнерів класів розпізнавання: а – клас розпізнавання X_1^o, б – клас розпізнавання X_2^o

Джерело: розроблено авторами.

Аналіз рис. 4 показує, що оптимальний радіус контейнера класу розпізнавання X_1^o дорівнює $d_1^* = 758$ кодових одиниць. При цьому визначення оптимального радіуса контейнера класу розпізнавання X_2^o є неоднозначним, оскільки на графіку (рис. 4б) існує ділянка екстремальних значень радіусів типу "плато". Згідно з мінімально-дистанційним принципом машинного навчання за оптимальне слід обрати мінімальне екстремальне значення радіуса. У нашому випадку оптимальний радіус контейнера класу розпізнавання X_2^o дорівнює $d_2^* = 988$ кодових одиниць.

Таким чином, можна стверджувати, що за результатами інформаційно-екстремального машинного навчання побудовано безпомилкові за навчальною матрицею вирішувальні правила, оскільки сумарна довжина оптимальних радіусів контейнерів класів розпізнавання, яка дорівнює 1746 кодовим одиницям, менше їх міжцентрової кодової відстані, яка становить 1752 кодових одиниць.

Точність машинного навчання оцінювалась шляхом кількісного тестування побудованих вирішувальних правил на екзаменаційній підмножині даних, що не брала участі в машинному навчанні. Для тестування використали 80 незалежних реалізацій (по 40 на кожен клас розпізнавання). У результаті тестування всі реалізації класу розпізнавання X_1^o було правильно класифіковано і дві реалізації класу розпізнавання X_2^o було помилково віднесено до класу розпізнавання X_1^o.

У процесі крос-валідації точність машинного навчання, яка характеризувала частку правильно класифікованих реалізацій і дає загальне уявлення про правильність моделі у випадку двохальтернативних рішень, дорівнювала *accuracy* = 0,975, що є високим показником.

Обговорення. У результаті застосування інформаційно-екстремального машинного навчання третього рівня глибини з оптимізацією рівня селекції ознак двійкових реалізацій класів розпізнавання побудовано високодостовірні вирішувальні правила. Висока точність досягається завдяки максимізації міжцентрової кодової відстані класів розпізнавання.

У відомих методах інформаційно-екстремального машинного навчання оптимізація рівня селекції ознак здійснювалася в обмеженому симетричному інтервалі відносно

$\rho = 0{,}5$. У статті експериментально виявлено глобальний екстремум функції інформаційного критерію біля нуля, що пояснюється тим, що для дуже близьких класів розпізнавання інформативними є ЕМГ-сигнали малої амплітуди. У результаті збільшення глибини інформаційно-екстремального машинного навчання системи розпізнавання ЕМГ-сигналів суттєво підвищило значення інформаційного критерію оптимізації параметрів порівняно з базовим алгоритмом. Запропонований підхід забезпечує:

1) максимізацію міжцентрової кодової відстані класів, що реалізує інформаційно-екстремальний підхід щодо розпізнавання образів, підвищуючи здатність системи відрізняти близькі класи сигналів;

2) підвищення стійкості до шумів та малоамплітудних біоімпульсів, що є критичною проблемою у сучасних методах розпізнавання ЕМГ-сигналів.

Таким чином, запропоноване рішення підвищує точність і функціональні можливості систем розпізнавання ЕМГ-сигналів у протезуванні порівняно з існуючими світовими аналогами [11; 18].

Висновки. Запропоновано метод глибокого інформаційно-екстремального машинного навчання системи розпізнавання ЕМГ-сигналів з оптимізацією рівня селекції ознак усереднених двійкових реалізацій класів розпізнавання. Шляхом оптимізації рівня селекції побудовано високо достовірні вирішувальні правила для найближчих класів розпізнавання, які характеризували ЕМГ-сигнали однакових жестів середнього та безіменного пальців руки.

Оскільки вирішувальні правила будуються в рамках геометричного підходу, то вони характеризуються високою оперативністю, наближеною до реального темпу часу, що є важливим показником функціональної ефективності протеза руки.

Перевагою запропонованого методу у порівнянні з моделлю «чорної скрині» штучної нейронної мережі є його висока інтерпретованість, що дозволяє забезпечити керованість процесу машинного навчання для досягнення його високої точності шляхом аналізу поточних значень інформаційного критерію оптимізації параметрів машинного навчання.

Подальшою актуальною науковою задачею дослідження є перехід до багатокласового інформаційно-екстремального машинного навчання системи розпізнавання ЕМГ-сигналів за ієрархічною структурою даних у вигляді декурсивного бінарного дерева. Крім того, доцільним є розширення підходу на багатоканальні ЕМГ-сенсори.

Reference

1. Svensson, P., Wijk, U., Björkman, A., & Antfolk, C. (2017). A review of invasive and non-invasive sensory feedback in upper limb prostheses. *Expert Review of Medical Devices*, *14*(6), 439–447. https://doi.org/10.1080/17434440.2017.1332989.

2. Salminger, S., Stino, H., Pichler, L. H., Gstoettner, C., Sturma, A., Mayer, J. A., Szivak, M., & Aszmann, O. C. (2022). Current rates of prosthetic usage in upper-limb amputees – Have innovations had an impact on device acceptance? *Disability and Rehabilitation, 44*(14), 3708–3713. https://doi.org/10.1080/09638288.2020.1866684.

3. Stango, A., Negro, F., & Farina, D. (2015). Spatial correlation of high density EMG signals provides features robust to electrode number and shift in pattern recognition for myocontrol. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, *23*(2), 189–198. https://doi.org/10.1109/tnsre.2014.2366752.

4. Sattar, N. Y., Kausar, Z., Usama, S. A., Farooq, U., & Khan, U. S. (2021). EMG based control of transhumeral prosthesis using machine learning algorithms. *International Journal of Control, Automation and Systems*. https://doi.org/10.1007/s12555-019-1058-5.

5. Abbaspour, S., Lindén, M., Gholamhosseini, H., Naber, A., & Ortiz-Catalan, M. (2019). Evaluation of surface EMG-based recognition algorithms for decoding hand movements. *Medical & Biological Engineering & Computing*, *58*(1), 83–100. https://doi.org/10.1007/s11517-019-02073-z.

6. Roche, A. D., Rehbaum, H., Farina, D., & Aszmann, O. C. (2014). Prosthetic myoelectric control strategies: A clinical perspective. *Current Surgery Reports*, *2*(3). https://doi.org/10.1007/s40137-013-0044-8.

7. Zhang, T., Jiang, L., & Liu, H. (2018). Design and functional evaluation of a dexterous myoelectric hand prosthesis with biomimetic tactile sensor. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, *26*(7), 1391–1399. https://doi.org/10.1109/tnsre.2018.2844807.

8. Markovic, M., Dosen, S., Popovic, D., Graimann, B., & Farina, D. (2015). Sensor fusion and computer vision for context-aware control of a multi degree-of-freedom prosthesis. *Journal of Neural Engineering*, *12*(6), 066022. https://doi.org/10.1088/1741-2560/12/6/066022.

9. Atzori, M., Cognolato, M., & Müller, H. (2016). Deep learning with convolutional neural networks applied to electromyography data: A resource for the classification of movements for prosthetic hands. *Frontiers in Neurorobotics*, *10*. https://doi.org/10.3389/fnbot.2016.00009.

10. Fang, Y., Yang, J., Zhou, D., & Ju, Z. (2022). Modelling EMG driven wrist movements using a bio-inspired neural network. *Neurocomputing*, *470*, 89–98. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.10.104.

11. Castruita-López, J. F., Aviles, M., Toledo-Pérez, D. C., Macías-Socarrás, I., & Rodríguez-Reséndiz, J. (2025). Electromyography signals in embedded systems: A review of processing and classification techniques. *Biomimetics*, *10*(3), 166. https://doi.org/10.3390/biomimetics10030166.

12. Hossen, M. A., & Abas, P. E. (2025). Machine learning for human activity recognition: State-of-the-art techniques and emerging trends. *Journal of Imaging*, *11*(3), 91. https://doi.org/10.3390/jimaging11030091.

13. Cui, C., Sunar, M. S., & Eg Su, G. (2025). Deep vision-based real-time hand gesture recognition: A review. *PeerJ Computer Science*, *11*, Article e2921. https://doi.org/10.7717/peerj-cs.2921.

14. Yu, M., Li, G., Jiang, D., et al. (2023). Hand medical monitoring system based on machine learning and optimal EMG feature set. *Personal and Ubiquitous Computing, 27*, 1991–2007. https://doi.org/10.1007/s00779-019-01285-2.

15. Mountrakis, G., Im, J., & Ogole, C. (2011). Support vector machines in remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *66*(3), 247–259. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.11.001.

16. Suprunenko, M. K., Zborshchyk, O. P., & Sokolov, O. (2022). Information-Extreme machine learning of wrist prosthesis control system based on the sparse training matrix. *Journal of Engineering Sciences*, *9*(2), E28—E35. https://doi.org/10.21272/jes.2022.9(2).e4.

17. Dovbysh, A., Piatachenko, V., Myronenko, M., Suprunenko, M., & Simonovskiy, J. (2024b). Hierarchical information-extreme machine learning of hand prosthesis control system based on decursive data structure. *Journal of Engineering Sciences*, *11*(2), E1–E8. https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(2).e1.

18. Kaczmarek, P., Mańkowski, T., & Tomczyński, J. (2019). PutEMG–A surface electromyography hand gesture recognition dataset. *Sensors*, *19*(16), 3548. https://doi.org/10.3390/s19163548.

19. Lin, L., Dai, Y., Zhang, G., Ge, Y., Mayet, A. M., Pan, X., Yang, G., & Lin, M. (2025). Low-Computational EMG gesture recognition for prosthetic control via handcrafted features and lightweight MLP. *Results in Engineering*, 106602. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106602.

References

1. Svensson, P., Wijk, U., Björkman, A., & Antfolk, C. (2017). A review of invasive and non-invasive sensory feedback in upper limb prostheses. *Expert Review of Medical Devices*, *14*(6), 439–447. https://doi.org/10.1080/17434440.2017.1332989.

2. Salminger, S., Stino, H., Pichler, L. H., Gstoettner, C., Sturma, A., Mayer, J. A., Szivak, M., & Aszmann, O. C. (2022). Current rates of prosthetic usage in upper-limb amputees – Have innovations had an impact on device acceptance? *Disability and Rehabilitation, 44*(14), 3708–3713. https://doi.org/10.1080/09638288.2020.1866684.

3. Stango, A., Negro, F., & Farina, D. (2015). Spatial correlation of high density EMG signals provides features robust to electrode number and shift in pattern recognition for myocontrol. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, *23*(2), 189–198. https://doi.org/10.1109/tnsre.2014.2366752.

4. Sattar, N. Y., Kausar, Z., Usama, S. A., Farooq, U., & Khan, U. S. (2021). EMG based control of transhumeral prosthesis using machine learning algorithms. *International Journal of Control, Automation and Systems*. https://doi.org/10.1007/s12555-019-1058-5.

5. Abbaspour, S., Lindén, M., Gholamhosseini, H., Naber, A., & Ortiz-Catalan, M. (2019). Evaluation of surface EMG-based recognition algorithms for decoding hand movements. *Medical & Biological Engineering & Computing*, *58*(1), 83–100. https://doi.org/10.1007/s11517-019-02073-z.

6. Roche, A. D., Rehbaum, H., Farina, D., & Aszmann, O. C. (2014). Prosthetic myoelectric control strategies: A clinical perspective. *Current Surgery Reports*, *2*(3). https://doi.org/10.1007/s40137-013-0044-8.

7. Zhang, T., Jiang, L., & Liu, H. (2018). Design and functional evaluation of a dexterous myoelectric hand prosthesis with biomimetic tactile sensor. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, *26*(7), 1391–1399. https://doi.org/10.1109/tnsre.2018.2844807.

8. Markovic, M., Dosen, S., Popovic, D., Graimann, B., & Farina, D. (2015). Sensor fusion and computer vision for context-aware control of a multi degree-of-freedom prosthesis. *Journal of Neural Engineering*, *12*(6), 066022. https://doi.org/10.1088/1741-2560/12/6/066022.

9. Atzori, M., Cognolato, M., & Müller, H. (2016). Deep learning with convolutional neural networks applied to electromyography data: A resource for the classification of movements for prosthetic hands. *Frontiers in Neurorobotics*, *10*. https://doi.org/10.3389/fnbot.2016.00009.

10. Fang, Y., Yang, J., Zhou, D., & Ju, Z. (2022). Modelling EMG driven wrist movements using a bio-inspired neural network. *Neurocomputing*, *470*, 89–98. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.10.104.

11. Castruita-López, J. F., Aviles, M., Toledo-Pérez, D. C., Macías-Socarrás, I., & Rodríguez-Reséndiz, J. (2025). Electromyography signals in embedded systems: A review of processing and classification techniques. *Biomimetics*, *10*(3), 166. https://doi.org/10.3390/biomimetics10030166.

12. Hossen, M. A., & Abas, P. E. (2025). Machine learning for human activity recognition: State-of-the-art techniques and emerging trends. *Journal of Imaging*, *11*(3), 91. https://doi.org/10.3390/jimaging11030091.

13. Cui, C., Sunar, M. S., & Eg Su, G. (2025). Deep vision-based real-time hand gesture recognition: A review. *PeerJ Computer Science*, *11*, Article e2921. https://doi.org/10.7717/peerj-cs.2921.

14. Yu, M., Li, G., Jiang, D., et al. (2023). Hand medical monitoring system based on machine learning and optimal EMG feature set. *Personal and Ubiquitous Computing, 27*, 1991–2007. https://doi.org/10.1007/s00779-019-01285-2.

15. Mountrakis, G., Im, J., & Ogole, C. (2011). Support vector machines in remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *66*(3), 247–259. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.11.001.

16. Suprunenko, M. K., Zborshchyk, O. P., & Sokolov, O. (2022). Information-Extreme machine learning of wrist prosthesis control system based on the sparse training matrix. *Journal of Engineering Sciences*, *9*(2), E28—E35. https://doi.org/10.21272/jes.2022.9(2).e4.

17. Dovbysh, A., Piatachenko, V., Myronenko, M., Suprunenko, M., & Simonovskiy, J. (2024b). Hierarchical information-extreme machine learning of hand prosthesis control system based on decursive data structure. *Journal of Engineering Sciences*, *11*(2), E1–E8. https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(2).e1.

18. Kaczmarek, P., Mańkowski, T., & Tomczyński, J. (2019). PutEMG–A surface electromyography hand gesture recognition dataset. *Sensors*, *19*(16), 3548. https://doi.org/10.3390/s19163548.

19. Lin, L., Dai, Y., Zhang, G., Ge, Y., Mayet, A. M., Pan, X., Yang, G., & Lin, M. (2025). Low-Computational EMG gesture recognition for prosthetic control via handcrafted features and lightweight MLP. *Results in Engineering*, 106602. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106602.

Дата першого надходження статті до видання: 19.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.01.2026

UDC 681.518:004.93

Mykyta Suprunenko, Mykyta Myronenko, Ivan Pavlenko, Dmytro Prylepa

[1]PhD in Computer Sciences, Assistant at the Department of Technical Service and Branch Mechanical Engineering
Sumy National Agrarian University (Sumy, Ukraine)
E-mail: mykyta.suprunenko@cs.sumdu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0001-8342-3003

[2]PhD, Assistant at the Department of Computer Science
Sumy State University, Sumy, Ukraine
E-mail: m.myronenko@cs.sumdu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-5005-1672

[3]Doctor of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher
Professor at the Volodymyr Martsynovskyi Department of Computational Mechanics,
Sumy State University (Sumy, Ukraine)
E-mail: i.pavlenko@cm.sumdu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-6136-1040

[4]PhD, Senior Lecturer at the Department of Computer Science,
Sumy State University (Sumy, Ukraine)
E-mail: d.prylepa@cs.sumdu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-4022-5496

METHOD OF DEEP INFORMATION-EXTREME MACHINE LEARNING FOR THE RECOGNITION SYSTEM OF EMG SIGNALS OF A HAND PROSTHESIS

The urgency of the research is driven by the growing requirements for the functional capabilities of modern bionic prostheses, which must ensure naturalness, smoothness, and high precision in reproducing finger movements in real-time. A promising direction for improving the non-invasive hand prosthesis is the development, within the framework of the functional bionic approach, of new machine learning methods that model the mechanism of classification decision-making by natural intelligence. Within this approach, the article considers a machine learning method that allows increasing the accuracy of EMG signal recognition under the condition of their significant intersection in the feature space.

Despite the rapid development of information-extreme machine learning methods, the influence of the selection level of features of averaged realizations of recognition classes on the accuracy of classification decisions remains under-researched. At the same time, optimization of the selection level by the information criterion allows maximizing the average inter-class distance for a given alphabet of recognition classes, which creates the necessary condition for achieving high machine learning accuracy. The article is aimed at solving the problem in prosthetics of increasing the recognition accuracy of EMG signals caused by cognitive commands for the execution of finger gestures.

The aim of the research is to increase the recognition accuracy of EMG signals with a high degree of intersection of recognition classes in the feature space by means of information-extreme machine learning, which models the decision-making mechanism by natural intelligence.

The article presents a method of deep information-extreme machine learning for recognizing EMG signals of two close recognition classes characterizing identical gestures of the middle and ring fingers. Machine learning has three levels of depth, at which the geometric parameters of hyperspherical containers of recognition classes, control tolerances on recognition features, and the selection level of features of averaged binary realizations of recognition classes are sequentially optimized. Optimization of the selection level allows solving two important tasks: bringing the calculated centers of class containers closer to their empirical scattering centers and implementing the maximum-distance principle by maximizing the average inter-class code distance. A functional categorial model of information-extreme machine learning of the third level of depth has been developed. A modified Kullback measure is used as the criterion for optimizing machine learning parameters. Computer simulation results showed that the basic machine learning algorithm of the second level of depth ensured the separability of recognition classes, but the values of the information criterion were not high. Increasing the depth level of machine learning with optimization of the selection level allowed significantly increasing the value of the information criterion. It was experimentally established that the global extremum of the criterion function is located near zero, which indicates the informativeness of low-amplitude EMG signals for very similar recognition classes. According to the cross-validation results, the machine learning accuracy was 0.975 (97.5 %).

A method of deep information-extreme machine learning with optimization of the feature selection level of averaged binary class realizations is proposed. Highly reliable decision rules have been constructed for close recognition classes with a high degree of intersection in the recognition feature space. The main advantage of the proposed method compared to neural networks is its high interpretability and computational efficiency, as the geometric approach allows making decisions at a pace close to real-time. The results confirm that maximizing the inter-center code distance improves the system's ability to distinguish close signal classes and increases resistance to noise. Further research will be aimed at multi-class information-extreme machine learning of the EMG signal recognition system using a hierarchical data structure.

***Keywords**: electromyographic signal; information-extreme machine learning; information criterion; optimization of machine learning parameters; hand prosthesis.*

Fig. 4. References: 19.

Супруненко М. К., Мироненко М. І., Павленко І. В., Прилепа Д. В. Підвищення точності машинного навчання системи розпізнавання електроміографічних сигналів. *Технічні науки та технології*, 2026. № 1(43). С. 128-140. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-128-140.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-141-148
УДК 004.056:004.94

Інна Анатоліївна Ярова
кандидат технічних наук, доцент кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення
Національний університет «Одеська політехніка» (Одеса, Україна)
E-mail: yarova@op.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-7154-6674. **SCOPUS Autor ID:** 57209250106

ФОРМАЛІЗОВАНА МОДЕЛЬ ПОРУШНИКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ ДЛЯ СИСТЕМ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ

Дослідження присвячене проблемі формалізації моделі порушника інформаційної безпеки. Моделі порушника інформаційної безпеки призначені для використання в процесах управління захистом інформації в кіберпросторі. В роботі запропоновано концептуальну модель порушника у вигляді ER-моделі, яка є структурованою системою ознак із високим ступенем абстрагування. На її основі розроблено формалізовану модель порушника у вигляді деталізованої структурованої системи ознак порушника із множинами значень для кожної ознаки та з можливістю оцінки рівня загрози інформаційній безпеці, яка охоплює категорії як зовнішніх, так і внутрішніх порушників.

Ключові слова: *інформаційна безпека; концептуальна модель порушника; формалізована модель порушника; класифікаційна ознака; профіль порушника; рівень загрози*
Рис.: 2. Табл.: 3. Бібл.: 14.

Актуальність теми дослідження. Складність та масштаб загроз інформації демонструють стрімке зростання, тому традиційні методи інформаційної безпеки втрачають свою ефективність. Потрібні нові інструменти для розширення можливостей реагування на загрози в режимі реального часу. Актуальним завданням є створення методологій захисту інформації, які використовують існуючі джерела експертизи для стратегічного прогнозування загроз, спираючись на характеристики суб'єктів загроз. Перспективним напрямом є ризик-орієнтовані моделі захисту інформації з можливістю адаптації засобів захисту до специфіки інформаційно-комунікаційних систем (ІКС) з урахуванням мінливості ландшафту загроз кіберпростору. Нагальним завданням є втілення принципу «безпека з етапу проєктування», який полягає в інтегруванні концепцій інформаційної безпеки та кібербезпеки в процес створення і експлуатації інфраструктурних об'єктів, забезпечуючи проактивність систем кіберзахисту протягом всього життєвого циклу технічних систем.

Постановка проблеми. Ключовим аспектом стійкості комплексних систем захисту інформації (КСЗІ) є їх здатність передбачати потенційні атаки, виявляти зміни операційних обставин, а також формулювати нові вимоги у сфері захисту інформації. Саме це визначає актуальність задачі моделювання порушника інформаційної безпеки як суб'єкта загроз. Модель порушника інформаційної безпеки є обов'язковою складовою КСЗІ, її застосування при проєктуванні та експлуатації КСЗІ є вимогою державних нормативів. Проте в базових нормативних документах технічного захисту інформації, наприклад [1], відсутні методики, що чітко регламентують процес створення моделі порушника. Рекомендації щодо змісту та структури моделі порушника мають описовий характер і дозволяють розробити тільки неформалізовану модель порушника, самі нормативні документи певною мірою є морально застарілими.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останніми роками спостерігається зростання уваги дослідників до питань, пов'язаних із порушниками інформаційної безпеки. Поширеним методом створення моделей порушника є математичне моделювання, а саме – логіко-імовірнісний підхід [2; 3]. Значна частина авторів обирає предметом дослідження одну з двох категорій порушників: або зовнішніх порушників, або внутрішніх. Причому спектр ознак та характеристик порушників зазвичай є доволі обмеженим та обирається виходячи з мети авторів дослідження [4; 5]. Моделюючи зовнішнього порушника, зазвичай вводять припущення про його високу кваліфікацію та обирають як кваліфікаційні ознаки можливості, тактики та методи, техніки та процедури, ресурси та інструменти. У тому випадку, коли у ролі зовнішнього порушника розглядається група осіб

© І. А. Ярова, 2026

із чітким розподілом обов'язків, для моделювання доцільно використовувати теорію графів [6]. Автори [3] вважають за необхідне розроблення для зовнішнього і внутрішнього порушника окремих моделей.

Значної уваги приділяється мотивації порушників: дослідження цього типу мають емпіричний характер, проводяться із використанням баз даних кіберінцидентів та пропонують аналітичні моделі [7; 8]. Слід пам'ятати, що зовнішні порушники завжди вчинюють свої дії свідомо, але внутрішні порушники не завжди мають за мету завдання шкоди. Для порушників з-поміж представників персоналу причиною кіберінцидентів розглядаються недбалість, втома, тиск часу, корпоративні взаємовідносини [9; 10].

Модерним напрямком досліджень є атрибуція та профілювання порушників безпеки із використанням штучного інтелекту [11]. Побудовані на цьому принципі предикативні моделі потребують навчання штучного інтелекту за певними алгоритмами, у тому числі за алгоритмами поведінки порушників [12].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Модель порушника являє собою його абстрактний формалізований або неформалізований опис. Абстрактність опису передбачає зосередженість на загальних характеристиках, властивих різним категоріям порушників. Неформалізована модель є викладенням інформації у вільній формі, на основі характеристик ІКС, що досліджується. Така модель може доволі деталізовано відображати об'єкт дослідження, але не може бути узагальненою саме через унікальність даних, на яких її побудовано. Проведений аналіз публікацій демонструє, що питанню створення формалізованих описів порушника приділяється недостатньо уваги. Варто зазначити, що формалізовані моделі порушника, які пропонуються науковою спільнотою, враховують малу кількість класифікаційних ознак [13; 14]. З огляду на це, дослідження у сфері створення формалізованої моделі порушника з високим ступенем деталізації та різнобічною оцінкою рівнів загрози є перспективним напрямком.

Метою дослідження є розроблення формалізованої моделі порушника інформаційної безпеки як структурованої системи профілів порушника, сформованих за ознаками, що розглядаються за чітко визначеною послідовністю, з оцінкою рівня загрози інформаційній безпеці кожного профілю та ранжуванням профілів.

Виклад основного матеріалу. Модель порушника інформаційної безпеки для КСЗІ є окремим документом, що згідно із нормативами розробляється після обстеження середовища функціонування ІКС на основі переліку загроз інформації та переліку об'єктів захисту. Методологія розроблення формалізованої моделі порушника засновується на розумінні проблемної області й повинна забезпечувати універсальність підходів і придатність використання для ІКС довільного розміру та напрямку діяльності.

Основою для формалізованої моделі порушника є концептуальна модель, що являє собою структурований опис ознак порушника із високим ступенем абстрагування. Концептуальна модель висвітлює причинно-наслідкові зв'язки в предметній галузі і є проміжним етапом між вербальною та формалізованою моделями порушника.

Концептуальну модель порушника представлено у вигляді ER-моделі, що дозволяє наочно зобразити її структуру у вигляді діаграми «сутності» – «їх атрибути» – «зв'язки між сутностями». Суттєвою перевагою ER-моделі є наочна візуалізація, яка дозволяє швидко оптимізувати структуру моделі з виявленням зайвих або відсутніх ознак порушника, а також можливість конвертації в табличну форму, що надалі спрощує формалізацію самої моделі й алгоритмізацію процесу її створення.

Для концептуальної моделі порушника (рис. 1) обрано три сутності: «Порушник», «Прогнозовані дії», «Імовірний результат». Між сутностями розміщено два зв'язки: «Ви-

конує» та «Отримує». Таким чином, сутності разом зі зв'язками створюють логічний ланцюжок, який описує процес порушення інформаційної безпеки: «Порушник» – «Виконує» – «Прогнозовані дії» – «Отримує» – «Імовірний результат».

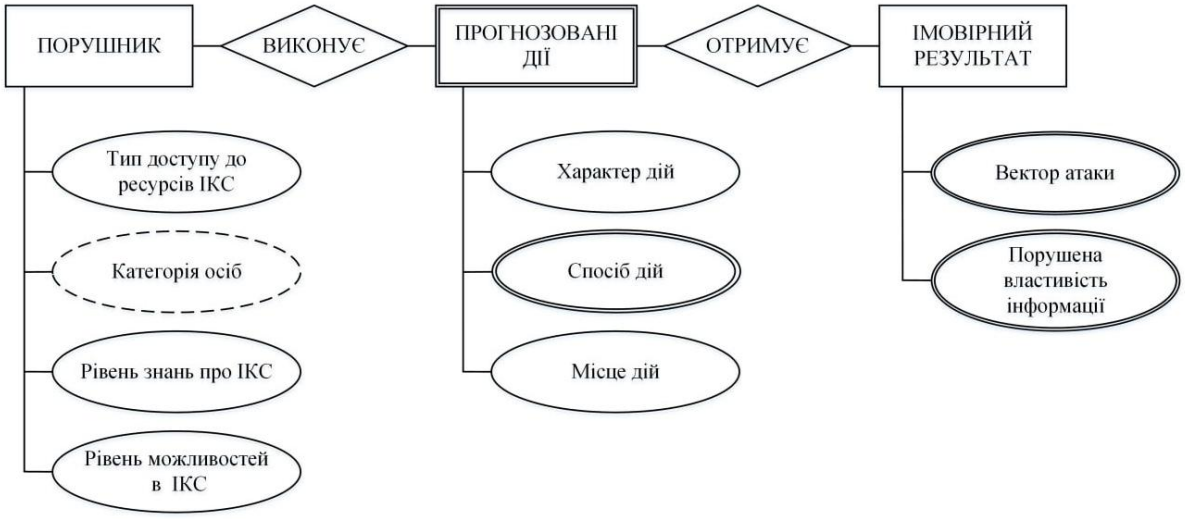


Рис. 1. Концептуальна модель порушника інформаційної безпеки
Джерело: розроблено автором.

Вихідною інформацією, яка використовується для опису порушника при створенні його концептуальної, а далі й формалізованої моделі, є ознаки порушника, що мають певні значення. Необхідно визначити атрибути сутностей, та призначити для кожного з них набори значень.

Ключовою в концептуальній моделі є сутність «Порушник», адже саме для опису порушника створюється формалізована модель. Обмеження на визначення для цієї сутності полягає в тому, що порушник – це особа або група осіб, які свідомо або несвідомо створює загрозу для ІКС. У такий спосіб виключено розгляд у ролі порушника будь-які випадкові події, які може нести загрозу для інформаційної системи. Вказана сутність є сильною: за значеннями її атрибутів можливим є однозначний опис порушника. Для сутності «Порушник» обрано такі атрибути: «Тип доступу до ресурсів ІКС», «Категорія осіб», «Рівень знать про ІКС», «Рівень можливостей в ІКС».

Атрибут «Тип доступу до ресурсів ІКС» є однозначним та може приймати одне з двох значень: «Зовнішній порушник» або «Внутрішній порушник». Це дозволяє в єдиній моделі охопити всі можливі категорії осіб-порушників, спрогнозувати їх дії та можливі наслідки порушень інформаційної безпеки. Атрибут «Категорія осіб» є похідним від атрибута «Тип доступу до ресурсів ІКС», його значення залежить від того, чи є порушник інформаційної безпеки зовнішнім або внутрішнім.

Сутність «Прогнозовані дії» призначена для опису імовірних дій порушника в інформаційній системі. Ця сутність є слабкою, оскільки значення її атрибутів залежать від значення атрибута «Тип доступу до ресурсів ІКС», ключової сутності моделі порушника. Для сутності «Прогнозовані дії» обрано однозначні атрибути «Характер дій», «Місце дій», та багатозначний атрибут «Спосіб дій».

Сутність «Імовірний результат» характеризує результат, який імовірно отримає порушник, реалізуючи загрозу. Ця сутність є сильною, оскільки незалежно від того, чи є порушник зовнішнім або внутрішнім, вона дає можливість чітко описати наслідки порушення інформаційної безпеки. Для сутності «Імовірний результат» призначено два багатозначні атрибути: «Вектор атаки» та «Порушена властивість інформації».

Розроблена концептуальна модель описує порушника інформаційної безпеки через взаємно пов'язані сутності, кожна з яких має власні атрибути. Вона є основою для розроблення формалізованої моделі порушника. Для перетворення концептуальної моделі у формалізовану модель необхідно виконати процес формалізації – представлення моделі у вигляді структурованої системи ознак порушника із множинами значень, які вводяться за чітко визначеною послідовністю.

Формалізована модель порушника інформаційної безпеки являє собою систему, складену з трьох блоків інформації – сутностей із атрибутами, що їм належать. Кожен атрибут має окремий набір значень, кожне значення в цьому наборі повинно мати власну оцінку рівня загрози за прийнятою шкалою (табл. 1). У розробленій концептуальній моделі обрано дев'ять атрибутів, кожен з яких має власний набір значень (табл. 2-4).

Таблиця 1 – Шкала оцінювання рівнів загрози інформаційної безпеки

Характеристика рівню загрози	Числове значення рівня загрози
Надзвичайно високий рівень загрози	5
Високий рівень загрози	4
Середній рівень загрози	3
Низький рівень загрози	2
Незначний рівень загрози	1

Джерело: розроблено автором

Таблиця 2 – Значення атрибута «Тип доступу до ресурсів ІКС»

Код значення	Значення атрибуту	Рівень загрози
ТД01	Зовнішній порушник	5
ТД02	Внутрішній порушник	4

Джерело: розроблено автором

Таблиця 3 – Значення атрибута «Порушена властивість інформації»

Код значення	Значення атрибуту	Рівень загрози
ПВ01	Порушення цілісності інформації	5
ПВ02	Порушення конфіденційності інформації	5
ПВ03	Порушення доступності інформації	4
ПВ04	Порушення спостереженості та керованості інформації	3
ПВ05	Несанкціоноване користування інформаційними ресурсами	2

Джерело: розроблено автором

Таблиця 4 – Значення атрибута «Характер дій»

Код значення	Значення атрибуту	Рівень загрози
ХД01	Використання засобів та заходів активного впливу на ІКС для зміни конфігурації системи	5
ХД02	Використання штатних засобів ІКС або недоліків проєктування КСЗІ для несанкціонованого доступу в систему	4
ХД03	Використання пасивних технічних засобів перехоплення інформаційних сигналів	3
ХД04	Використання виключно агентурних методів отримання інформації	2

Джерело: розроблено автором.

Для практичного використання важливим елементом формалізованої моделі порушника є кількісна оцінка сформованих профілів порушника. Результуюче значення рівня загрози для кожного профілю порушника визначається як добуток числових значень рівнів загрози всіх значень атрибутів моделі порушника. Воно є оцінкою рівня загрози для профілів порушників в розробленій формалізованій моделі. Один прохід по моделі із по-

слідовним вибором значень для кожного з атрибутів формує окремий профіль порушника. Сукупність сформованих профілів порушників являє собою результат використання формалізованої моделі порушника інформаційної безпеки.

Практичною реалізацією розробленої формалізованої моделі порушника інформаційної безпеки є програмний продукт, побудований як послідовність виконання скінченної кількості операцій вибору значень для заданих атрибутів – класифікаційних ознак порушника. Оптимальним способом представлення моделі порушника для практичного використання є подання в табличній формі, у вигляді зведеного переліку профілів порушників, з описом характеристик кожного профілю та з ранжуванням профілів за зменшенням рівня загрози інформаційній безпеці (рис. 2). Таке подання є зручним для практичного використання при проєктуванні та експлуатації КСЗІ або у процесах управління ризиками інформаційної безпеки.

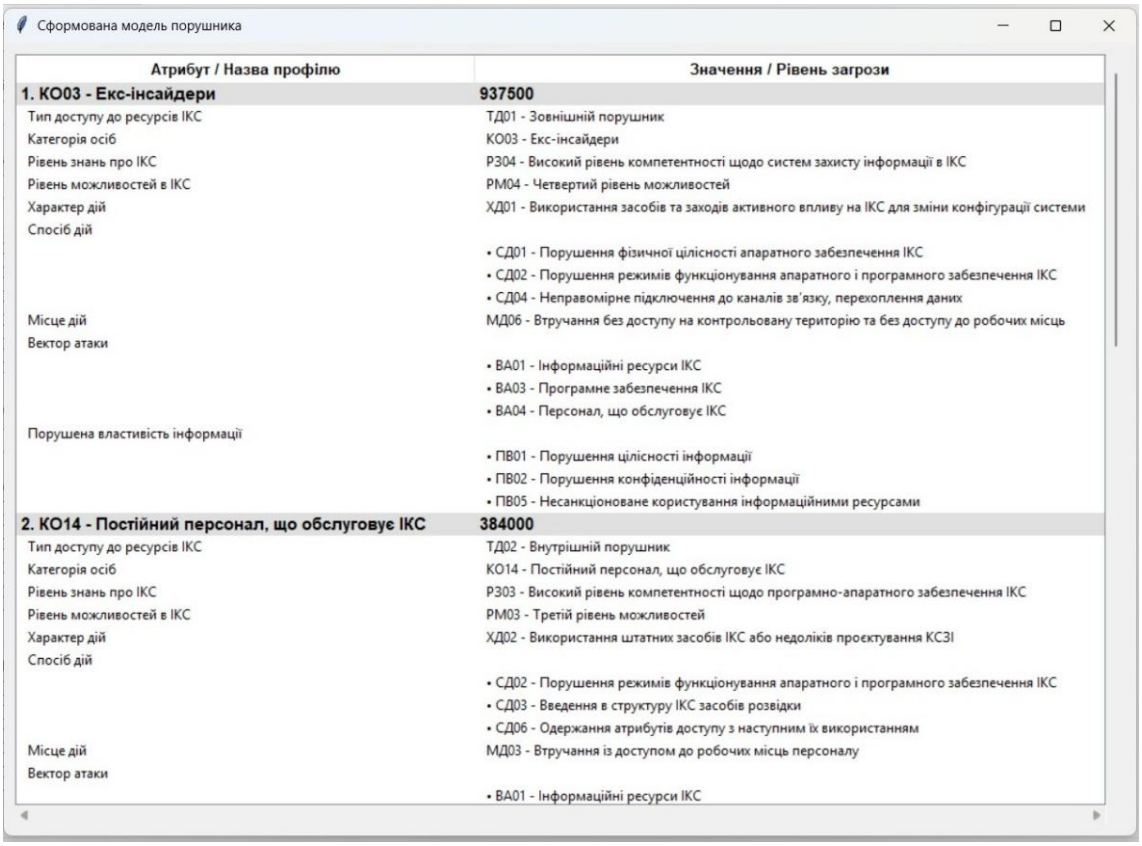


Рис. 2. Візуалізація формалізованої моделі порушника інформаційної безпеки: скріншот вікна програмного продукту

Джерело: розроблено автором.

Висновки. Спроможність вчасно розпізнати кібератаку та точно ідентифікувати порушника має ключове значення для визначення рівня загрози та вибору необхідних заходів захисту. Існуючи практики захисту інформації приділяють недостатньо уваги питанню моделювання порушників інформаційної безпеки як джерела загроз. Сучасна нормативна документація не пропонує уніфікованих підходів щодо розроблення моделі порушника. Визначення подібних підходів і формалізація методів побудови моделі порушника створюють передумови для підвищення адекватності систем технічного захисту інформації у процесі проєктування і подальшої комплексної оцінки їхньої ефективності під час функціонування. Актуальним завданням захисту інформації є реалізація принципу проактивної ідентифікації загроз, вчасного реагування та ефективного пом'якшення ризиків.

Розроблена модель порушника інформаційної безпеки – виконаний з високим ступенем формалізації деталізований опис осіб, що з певною імовірністю можуть здійснювати несанкціонований доступ до ІКС. У розробленій моделі задаються, враховуються та оцінюються ознаки цих осіб, в тому числі вперше – ознаки «Вектор атаки» та «Порушена властивість інформації». Опис порушника виконується за структурованою системою з дев'яти класифікаційних ознак, значення яких визначаються в заданій послідовності. Кожна ознака має власний набір значень з оцінкою рівня загрози для кожного значення. Результатом одноразового проходження по формалізованої моделі є формування профілю порушника із підсумковою оцінкою рівня загрози. Сукупність сформованих профілів можливих порушників, розташованих за зменшенням рівня загрози, є моделлю порушника в прикладному розумінні – саме вона використовується для систем захисту інформації згідно з вимогами НД ТЗІ.

Запропонована формалізована модель порушника інформаційної безпеки надає можливість урахувати тип доступу порушника до ІКС, та об'єднує в єдиному документі профілі як зовнішніх, так і внутрішніх порушників. Використання розробленої формалізованої моделі порушника підвищує ефективність захисту інформації за рахунок управління ризиками шляхом оцінки потенційних загроз на основі та контекстного аналізу. Отже, реалізуються результативний розподіл ресурсів захисту між критично важливими компонентами ІКС та оптимізація загальної стратегії безпеки.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті

Під час проведення дослідження автор застосовувала Google Translator для огляду наукових публікацій в іноземних виданнях та перевірки граматики при перекладі анотації англійською мовою. Після використання Google Translator автор переглянула та відредагувала текст та бере на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Департамент спеціальних телекомунікаційних систем та захисту інформації Служби безпеки України. (2000). *Типове положення про службу захисту інформації в автоматизованій системі (НД ТЗІ 1.4-001-2000)*.

2. Dymova, H. O. (2025). Investigation of methods for improving intruderdetection efficiency in physical protection systems. *Таврійський науковий вісник, Серія: Технічні науки*, *3*, 75-84. https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.3.9.

3. Пількевич, І. А., Бойченко, О. С., & Гуменюк, І. В. (2020). Удосконалення методу розробки логіко-імовірнісної моделі внутрішнього порушника. *Електронне моделювання, 42*(4), 71-85. 10.15407/emodel.42.04.071.

4. Tatam, M., Shanmugam, B., Azam, S., & Kannoorpatti, K. (2021). A review of threat modelling approaches for APT-style attacks. *Heliyon,* 7, 1. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e05969.

5. Liu, Y., Li, S., Wang, X., & Xu, L. (2024). A Review of Hybrid Cyber Threats Modelling and Detection Using Artificial Intelligence in IIoT. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 140(2), 1233-1261. https://doi.org/10.32604/cmes.2024.046473.

6. Браіловський, М. М., Зибін, С. В., Кобозєва, А. А., Хорошко, В. О., & Хохлачова Ю. Є. (2021). *Аналіз кіберзахищенності інформаційних систем*. ФОП Ямчинський О. В.

7. Pseftelis, T., & Chondrokoukis, G. (2025). Cyber Attack Motivations: Connecting Actors with Event Types. Preprints. https://doi.org/10.20944/preprints202505.1003.v1.

8. Kaiser, F., Wiens, M., & Schultmann, F. (2021). Motivation-based Attacker Modelling for Cyber Risk Management: A Quantitative Content Analysis and a Natural Experiment, *Journal of Information Security & Cybercrimes Research*, 4(2), 132-147. https://doi.org/10.26735/NMMD9869.

9. Colabianchi, S., Costantino, F., Nonino, F., & Palombi, G. (2025). Transforming threats into opportunities: The role of human factors in enhancing cybersecurity. *Journal of Innovation & Knowledge,* 10 (3). https://doi.org/10.1016/j.jik.2025.100695.

10. Haag, S., Siegfried, N., & Winkler, N. (2025). Informal control responses to information security policy violations: A factorial survey on insurance employees' moral licensing of insider threats. *Computers & Security,* 157. https://doi.org/10.1016/j.cose.2025.104575.

11. Irshad, E., & Basit Siddiqui, A. (2023). Cyber threat attribution using unstructured reports in cyber threat intelligence. *Egyptian Informatics Journal,* 24(1), 43-59. https://doi.org/10.1016/j.eij.2022.11.001.

12. Beauden, J. (2025). Integrating Machine Learning with Threat Hunting: A Predictive Model for Real-Time Cyber Threat Detection and Response. https://www.researchgate.net/publication/394098833_Integrating_Machine_Learning_with_Threat_Hunting_A_Predictive_Model_for_Real-Time_Cyber_Threat_Detection_and_Response.

13. Снєосіков, О. А., & Нарєжній, О. П. (2025). Моделі загроз та порушника автономної системи диференціальної корекції глобальних навігаційних супутникових систем. *Вісник ХНТУ,* 3(94), 2, 423-434. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.2.54.

14. Комаров, М. Ю., Ониськова, А. В., & Гончар, С. Ф. (2018). Аналіз і дослідження моделі порушника безпеки інформації для захищеного вузла Інтернет доступу. *Вчені записки ТНУ ім. В. І. Вернадського: Технічні науки,* 29(68), 1, 5, 138-142. https://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2018/5_2018/part_1/26.pdf.

References

1. Departament spetsialnykh telekomunikatsiinykh system ta zakhystu informatsii Sluzhby bezpeky Ukrainy. (2000). [Department of Special Telecommunications Systems and Information Protection of the Security Service of Ukraine. (2000).] *Typove polozhennia pro sluzhbu zakhystu informatsii v avtomatyzovanii systemi (ND TZI 1.4-001-2000)- Standard provisions on information protection services in automated systems (ND TZI 1.4-001-2000).*

2. Dymova, H. O. (2025). Investigation of methods for improving intruderdetection efficiency in physical protection systems. *Tavriiskyi naukovyi visnyk, Seriia: Tekhnichni nauky – Tavria Scientific Bulletin, Series: Technical Sciences, 3,* 75-84. https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.3.9.

3. Pilkevych, I. A., Boichenko, O. S., & Humeniuk, I. V. (2020). Udoskonalennia metodu rozrobky lohiko-imovirnisnoi modeli vnutrishnoho porushnyka [Improving the method of developing a logical-probabilistic model of an internal violator]. *Elektronne modeliuvannia – Electronic modeling, 42*(4), 71-85. 10.15407/emodel.42.04.071.

4. Tatam, M., Shanmugam, B., Azam, S., & Kannoorpatti, K. (2021). A review of threat modelling approaches for APT-style attacks. *Heliyon, 7,* 1. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e05969.

5. Liu, Y., Li, S., Wang, X., & Xu, L. (2024). A Review of Hybrid Cyber Threats Modelling and Detection Using Artificial Intelligence in IIoT. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 140(2), 1233-1261. https://doi.org/10.32604/cmes.2024.046473.

6. Brailovskyi, M. M., Zybin, S. V., Kobozieva, A. A., Khoroshko, V. O., & Khokhlachova, Yu. Ye. (2021). *Analiz kiberzakhyshchennosti informatsiinykh system* [*Analysis of cybersecurity of information systems*]. FOP Yamchynskyi O. V.

7. Pseftelis, T., & Chondrokoukis, G. (2025). Cyber Attack Motivations: Connecting Actors with Event Types. Preprints. https://doi.org/10.20944/preprints202505.1003.v1.

8. Kaiser, F., Wiens, M., & Schultmann, F. (2021). Motivation-based Attacker Modelling for Cyber Risk Management: A Quantitative Content Analysis and a Natural Experiment, *Journal of Information Security & Cybercrimes Research*, 4(2), 132-147. https://doi.org/10.26735/NMMD9869.

9. Colabianchi, S., Costantino, F., Nonino, F., & Palombi, G. (2025). Transforming threats into opportunities: The role of human factors in enhancing cybersecurity. *Journal of Innovation & Knowledge,* 10 (3). https://doi.org/10.1016/j.jik.2025.100695.

10. Haag, S., Siegfried, N., & Winkler, N. (2025). Informal control responses to information security policy violations: A factorial survey on insurance employees' moral licensing of insider threats. *Computers & Security,* 157. https://doi.org/10.1016/j.cose.2025.104575.

11. Irshad, E., & Basit Siddiqui, A. (2023). Cyber threat attribution using unstructured reports in cyber threat intelligence. *Egyptian Informatics Journal,* 24(1), 43-59. https://doi.org/10.1016/j.eij.2022.11.001.

12. Beauden, J. (2025). Integrating Machine Learning with Threat Hunting: A Predictive Model for Real-Time Cyber Threat Detection and Response. https://www.researchgate.net/publication/394098833_Integrating_Machine_Learning_with_Threat_Hunting_A_Predictive_Model_for_Real-Time_Cyber_Threat_Detection_and_Response.

13. Snieosikov, O. A., & Nariezhnii, O. P. (2025). Modeli zahroz ta porushnyka avtonomnoi systemy dyferentsialnoi korektsii hlobalnykh navihatsiinykh suputnykovykh system [Threat and intruder models of the autonomous differential correction system of global navigation satellite systems]. *Visnyk KhNTU – Bulletin of KhNTU,* 3(94), 2, 423-434. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.2.54

14. Komarov, M. Yu., Onyskova, A. V., & Honchar, S. F. (2018). Analiz i doslidzhennia modeli porushnyka bezpeky informatsii dlia zakhyshchenoho vuzla Internet dostupu [Analysis and research of information security violator model for a protected Internet access node]. *Vcheni zapysky TNU im. V. I. Vernadskoho: Tekhnichni nauky – Scientific notes of V. I. Vernadsky TNU. Series: Technical Sciences,* 29(68), 1, 5, 138-142. https://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2018/5_2018/part_1/26.pdf.

Дата першого надходження статті до видання: 24.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 12.01.2026

УДК 004.056:004.94

Inna Yarova

PhD, Associate Professor, Department of Cybersecurity and Software
Odesa Polytechnic National University (Odesa, Ukraine)
E-mail: yarova@op.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-7154-6674. **SCOPUS Autor ID:** 57209250106

FORMALIZED MODEL OF INFORMATION SECURITY VIOLATOR FOR INFORMATION PROTECTION SYSTEMS

The study is devoted to the problem of formalizing the model of information security violator. The model of information security violator is a mandatory component of comprehensive information protection systems in the digital space as an element of information security risk management. According to the risk-oriented approach, the violator model should be proactive, and should be used throughout the life cycle of information-communication systems, from the design stage to the decommissioning stage.

Based on the analysis of regulatory documentation in the field of technical information protection, it was established that there is no single standardized methodology for developing the violator model. Existing methodologies are of a recommendatory nature and make it possible to develop only an informal description of information security violator, with a small number of features and without a numeric assessment of threat level. The analysis of scientific papers demonstrates the unilateral approach in this field and confirms the relevance of chosen research topic.

The conceptual model of information security violator in the form of the ER-model is proposed, which is a structured system of violator characteristics with a high degree of abstraction. Based on it, a formalized model of information security violator is developed in the form of a detailed structured system of violator characteristics with the sets of value for each characteristic and with assessment of the level of information security threat for each characteristic.

The outcome from the developed model of information security violator is generation of a set of profiles of potential violators with an assessment of the overall threat level for each violator profile and with ranking of profiles by decreasing of their overall threat level. The developed model of information security violator enables to generate profiles both for external and internal user violators. In generation a violator profile, nine classification features are taken into account, including the first proposed features "The Attack Vector" and "Violated Information Property". The proposed formalized model of information security violator provides the prerequisites for effective visualization of modeling results. On its basis, a software product for practical use can be designed.

Keywords: *information security; conceptual model of information security violator; formalized model of information security violator; profile of violator; classification feature; threat level.*

Fig.: 2. Table: 3. References: 14.

Ярова І. А. Формалізована модель порушника інформаційної безпеки для систем захисту інформації. *Технічні науки та технології.* 2026. № 1(43). С. 141-148. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-141-148.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-149-160
УДК 004.94

***Тарас Павлович Бивойно*[1], *Павло Георгійович Бивойно*[2]**

[1]старший викладач кафедри інформаційних технологій та програмної інженерії
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: tbivoyno@gmail.com. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0001-6914-5441. **ResearcherID**: B-7478-2017

[2] кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: p.g.byvoino@gmail.com. **ORCID**: https://orcid.org/0000-0001-8145-8459. **ResearcherID:** R-7447-2016

АРХІТЕКТУРА ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ФУНКЦІЙ РЕГРЕСІЇ (В УМОВАХ ЛОКАЛЬНИХ ЕКСТРЕМУМІВ) З ВИКОРИСТАННЯМ ГІБРИДНОГО ПІДХОДУ

Представлена в статті інформація є науково-методичного характеру. Представлено підсистему, яка інтегрована у середовище імітаційного моделювання, що використовується для вивчення перехідної поведінки систем масового обслуговування (СМО) і поєднує модельні експерименти як для ідентифікації параметрів, так і для аналізу впливу конфігурацій СМО на перехідну поведінку. Архітектура підсистеми передбачає використання різних методів числової оптимізації, адаптованих до математичних моделей. Використовується гібридний підхід, що дозволяє подолати проблему локальних екстремумів, властиву деяким моделям. Доступ до всіх методів забезпечується через єдиний інтерфейс, який забезпечує уніфікацію взаємодії з підсистемою та масштабування системи для нових функцій регресії.

***Ключові слова**: оцінювання параметрів регресії; числова ідентифікація параметрів; імітаційне моделювання; системи масового обслуговування (СМО); гібридний алгоритм оптимізації; об'єктно-орієнтована архітектура програмного забезпечення.*

Рис.: 6. Бібл.: 8.

Актуальність теми дослідження. Підсистема, що розглядається, є складовою частиною комп'ютерного середовища імітаційного моделювання для визначення параметрів перехідної поведінки систем масового обслуговування (СМО). Перехідна поведінка СМО мало досліджена. Водночас це питання потребує вирішення, оскільки актуальним є завдання розрахунку потужності СМО для успішної обробки короткострокових потоків заявок, з використанням гібридного підходу, зокрема, кількості засобів ППО для успішної протидії повітряним атакам.

Постановка проблеми. У комп'ютерному середовищі імітаційного моделювання для визначення параметрів перехідної поведінки СМО є декілька підсистем, в яких потрібно знаходити функції регресії для представлення і подальшого використання результатів імітаційних експериментів. Ці функції регресії суттєво відрізняються між собою і знаходження їх оптимальних параметрів потребує застосування різних методів оптимізації. Створення багатофункціональної підсистеми пошуку параметрів функції регресії (БППФР) з використанням гібридного підходу дозволить удосконалити архітектуру комп'ютерного середовища, підвищити її надійність і спростити налаштування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання визначення параметрів функцій регресії для представлення експериментальних даних достатньо добре вивчено. Ці питання розглядаються як у класичних монографіях[1], так і в навчальних посібниках для студентів [2]. Для обробки експериментальних даних існують сучасні, достатньо ефективні інструменти. Для вирішення простих задач можна використовувати табличний процесор MS Excel [3]. Більш складні завдання допомагає вирішувати Mathcad [4]. Але проблема полягає в тім, що такий інструмент потрібно вбудувати у спеціалізовану систему імітаційного моделювання. Тому доводиться створювати програмну реалізацію такого інструменту. Це завдання вимагає використання певних алгоритмів пошуку оптимальних рішень. Вирішенню цієї сторони проблеми як загалом, так окремих нестандартних випадків присвячено багато публікацій, зокрема [5-7] і результати цих досліджень можна використовувати для реалізації БППФР. Про спроби підійти до побудови подібної підсистеми є інформація в роботі [8], де розглядався проєкт, у складі якого було розроблено

© Т. П. Бивойно, П. Г. Бивойно, 2026

дві окремих підсистеми. Одна використовувалася для визначення параметрів функції регресії для перехідного процесу для розміру черги СМО, інша для обробки результатів одно факторних багаторівневих експериментів.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз показує, що кожна окрема складова нашої проблеми добре досліджена та існують достатньо ефективні інструменти для обробки експериментальних даних. У роботі [8] цю проблему було вирішено частково. Проте нам потрібно об'єднання всіх складових проблеми в єдиному програмному комплексі, який можна буде вбудувати в середовище імітаційного моделювання для дослідження перехідної поведінки, а можливо і в інші системи.

Метою роботи є розробка архітектури і практична реалізація БППППФР на мові Java для середовища дослідження перехідної поведінки СМО засобами імітаційного моделювання.

Виклад основного матеріалу. Щоб визначитися з вимогами до програмних засобів, як мають бути реалізовані у підсистемі, розглянемо математичні моделі, які будуть використовуватися в середовищі імітаційного моделювання.

Моделі перехідної поведінки СМО. Перехідну поведінку СМО можна представити перехідним процесом для розміру черги. Для простої неперевантаженої СМО можна використовувати модель, яку було запропоновано в роботі [8]. Це експоненційний процес, що описується формулою (1).

$$q(t) = q_{\text{ст}}(1 - e^{\frac{-t}{tau}}), \quad (1)$$

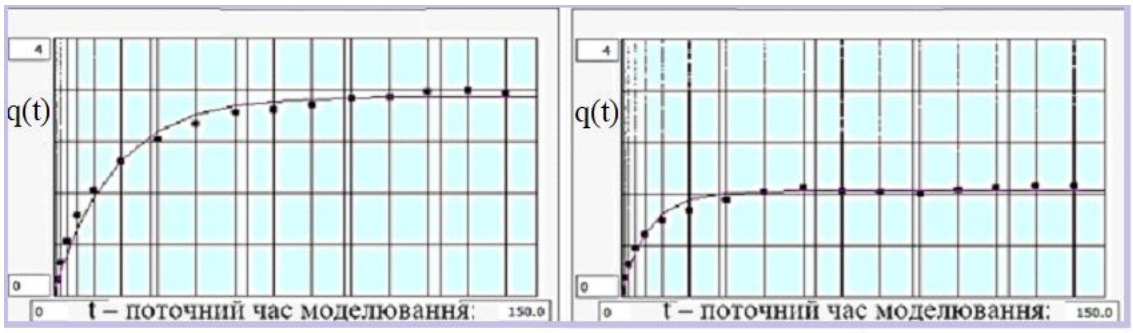
де q(t) – функція зміни середньої довжини черги в часі;

t – поточний час моделювання;

$q_{\text{ст}}$ – стале значення середньої довжини черги;

tau – стала часу (параметр, від якого залежить час переходу середньої довжини черги до сталого значення та тривалість перехідного процесу).

Модель характеризують два параметри – стале значення середньої довжини черги $q_{\text{ст}}$ та стала часу tau. Така модель добре описує перехідний процес у черзі не тільки для марківської СМО, але і для інших СМО. На рис. 1 можна побачити, як така модель узгоджується з експериментальними даними для СМО M/M/1/∞ та СМО M/G/1/∞ з коефіцієнтом завантаження 0,8.



а б

Рис. 1. Перехідна поведінка для СМО з коефіцієнтом завантаження 0,8: а – СМО M/M/1/∞; б – СМО M/G/1/∞

Джерело: розроблено авторами.

Якщо система перевантажена, то сталий режим для середньої довжини черги наступити не може. Черга буде безперервно зростати, але швидкість зростання з часом прийде до сталого значення. У такому разі перехідним процесом можна вважати процес зміни швидкості зростання черги від нульового до сталого значення. Можна припустити, що швидкість зміни розміру такої черги також буде змінюватися експоненційно відповідно

до формули 1, поки не досягне сталого значення. Експерименти підтвердили це припущення. У цьому випадку математичну модель перехідного процесу для середньої довжини черги можна представити формулою (2), яку отримано шляхом інтегрування правої частини формули 1.

$$q(t) = v_{ст} * (t - tau * e^{\frac{-t}{tau}}), \quad (2)$$

де q(t) – функція зміни середньої довжини черги в часі;

t – поточний час моделювання;

$v_{ст}$ – стале значення швидкості зміни середньої довжини черги;

tau – стала часу (параметр, від якого залежить час переходу швидкості зміни середньої довжини черги до сталого значення).

Тут також маємо два параметри – $v_{ст}$ і tau.

На рис. 2, *а* показано представлення експериментальних даних зміни черги в перевантаженій СМО M/M/1/∞ за допомогою експоненціальної моделі.

Таку модель можна також використовувати і для оцінки перехідних процесів на виході неперевантажених СМО. Для цього на виході системи можна додати чергу, яка буде приймати опрацьовані заявки. Розмір такої черги буде постійно зростати, але в цьому процесі зростання також можна виділити перехідний процес для швидкості зростання.

Виходячи з того, що нас цікавить не вигляд перехідного процесу, а тільки його параметри, то математичну модель перехідного процесу у перевантаженій СМО можна представити у вигляді двох прямих ліній, рис. 2, *б*.

Відповідна залежність описується формулою (3).

$$q(t) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } t \le tau \\ v_{ст} * (t - tau), & \text{якщо } t > tau \end{cases}, \quad (3)$$

де q(t) – функція зміни середньої довжини черги в часі;

t – поточний час моделювання;

$v_{ст}$ – стале значення швидкості зміни середньої довжини черги;

tau – час, впродовж якого можна вважати, що довжина черги змінюється не суттєво.

Тут також маємо два параметри – $v_{ст}$ і tau. Останній може використовуватися для оцінки тривалості перехідного процесу.

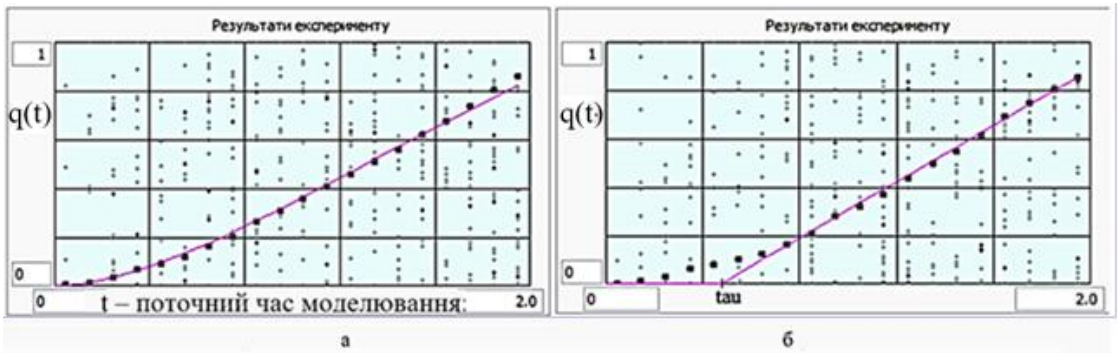


Рис.2. Характер середнього розміру черги в перевантаженій СМО (дрібними точками показані значення розміру черг в окремих реалізаціях процесу) а – експоненційна модель; б – лінеаризована модель

Джерело: розроблено авторами.

Якщо заявки, до появи в черзі, проходять попередньо декілька фаз обслуговування. то процес накопичення заявок в таких чергах затримується на початковій стадії. Для таких черг процес зміни середнього значення черги може виглядати так, як показано на

рисунку 3. Тобто спочатку середня довжина черги майже не змінюється, потім починається процес накопичення заявок і в решті решт настає сталий режим.

Для таких черг можна застосувати математичну модель, яка буде комбінацією лінеаризованої та експоненційної моделей, формула (4).

$$q(t) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } t \le dely \\ q_{\text{ст}} * \left(1 - e^{\frac{-(t-delay)}{tau}}\right), & \text{якщо } t > dely \end{cases}, \quad (4)$$

де q(t) – функція зміни середньої довжини черги в часі;

t – поточний час моделювання;

v – стале значення швидкості зміни середньої довжини черги;

delay – час, коли можна вважати, що довжина черги змінюється не суттєво.

tau – стала часу (параметр, від якого залежить час переходу середньої довжини черги до сталого значення,

У цьому випадку тривалість перехідного процесу буде визначатися параметрами tau та delay.

Рис. 3. Процес зміни середньої довжини черги на останніх фазах обробки в багатофазній СМО

Джерело: розроблено авторами.

Моделі залежності параметрів СМО від коефіцієнта завантаження. Система імітаційного моделювання, для якої розробляється БППППФР, дозволяє проводити серії багаторівневих одно факторних експериментів для визначення впливу коефіцієнта завантаження на параметри системи. Такими параметрами є середня довжина черги у сталому режимі та стала часу перехідного процесу, від якої залежить його тривалість.

На рис. 4 показані результати експериментів по визначенню цих залежностей для простої марківської СМО M/M/1/∞.

Для середньої довжини черги у сталому режимі СМО M/M/1/∞ відома теоретична залежність, яка описується формулою (5), у якій коефіцієнт k = 1.

$$\bar{q} = k\frac{\omega^2}{1-\omega}, \quad (5)$$

де $\bar{q}$ – середня довжина черги;

ω – коефіцієнт завантаження системи.

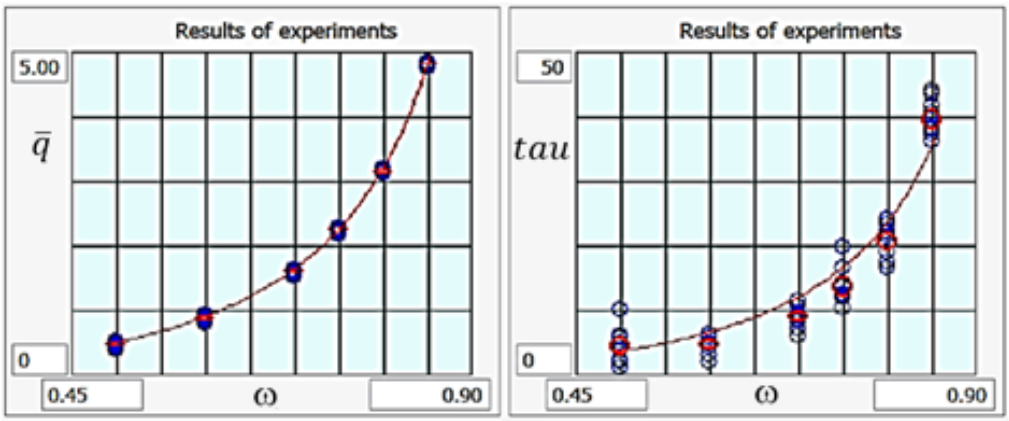
Що стосується залежності сталої часу перехідного процесу від коефіцієнта завантаження, то для неї теоретичних результатів не існує. Функція регресії у вигляді формули (5), яка була знайдена для даних, що представлені на рис. 4, *б*, виявилася неадекватною. А для пошуку адекватної функції регресії треба мати можливість експериментувати з різними формулами. Зокрема розглядались формули (6), (7), (8).

$$tau = k_1\frac{\omega^2}{1-\omega}e^{\left(\frac{k_2}{1-\omega^2}\right)}, \quad (6)$$

$$tau = k_1 \frac{\omega^2}{1-\omega} - e^{-k_2(\omega - k_3)^2}, \quad (7)$$

$$tau = k_1 \frac{\omega^{k_2}}{1-\sqrt{\omega}} + k_3, \quad (8)$$

де tau – стала часу перехідного процесу;
ω – коефіцієнт завантаження системи;
k_1, k_2, k_3 – коефіцієнти, значення яких потрібно знайти.



а б

Рис. 4. Залежність параметрів СМО від коефіцієнта завантаження: а – середня довжина черги; б – стала часу перехідного процесу

Джерело: розроблено авторами.

Отримання параметрів функції регресії для перехідного процесу. Завдання пошуку функції регресії для даних, що отримані в результаті експериментів, полягає у знаходженні таких параметрів вибраної математичної моделі, при яких лінія регресії буде проходити якомога ближче до експериментальних точок. Тобто задача полягає у пошуку оптимальних параметрів математичної моделі для наявних експериментальних даних. Для вирішення цього завдання потрібно визначитися з цільовою функцією та алгоритмом пошуку оптимуму.

Вибір цільової функції. Цільова функція є критерієм оцінки близькості лінії регресії до експериментальних точок. Значення цільової функції залежить від значень параметрів і має збільшуватися, якщо лінія регресії віддаляється від експериментальних точок, і зменшуватися при її наближенні. Найкращими значеннями параметрів будуть такі, при яких цільова функція має мінімальне значення.

Найбільш популярною цільовою функцією є така, що представляється у вигляді суми квадратів відхилень експериментальних точок від відповідних значень лінії регресії, вираз (9). Популярність цієї функції пояснюється тим, що вона є диференційованою і дозволяє в деяких випадках знайти аналітичне рішення шляхом вирішення системи рівнянь, де часткові похідні за параметрами функції регресії прирівнюються до нуля.

$$\sum_{i=1}^{n} (q_i^{\text{регр}} - q_i^{\text{експ}})^2 \rightarrow min \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^{n} |q_i^{\text{регр}} - q_i^{\text{експ}}| \rightarrow min \quad (10)$$

де $q_i^{\text{експ}}$ – ордината експериментальної точки,
$q_i^{\text{регр}}$ – ордината відповідної точки на лінії регресії.

Якщо ж для пошуку екстремуму будуть застосовуватися чисельні методи пошуку, то вигляд цільової функції не накладає суттєвих обмежень на реалізацію алгоритму пошуку оптимальних значень коефіцієнтів функції регресії. Тому в цьому випадку можна

застосувати й вираз (10), де мінімізується сума абсолютних відхилень експериментальних даних від лінії регресії. У БППППФР ми реалізуємо можливість вибору з наведених варіантів цільової функції у тих випадках, коли це можливо.

Алгоритми пошуку. Усі розглянуті математичні моделі для перехідних процесів та більшість моделей для залежності параметрів перехідного процесу від коефіцієнта завантаження представлені формулами, які не дозволяють отримати оптимальні значення коефіцієнтів функції регресії методом найменших квадратів, тому що після взяття похідних за невідомими коефіцієнтами отримуємо систему трансцендентних рівнянь, яку неможливо вирішити аналітично. З іншого боку, для всіх розглянутих моделей можна знайти коефіцієнти функції регресії чисельними методами. Розглянемо деякі з них.

Алгоритм координатного спуску. Такий алгоритм достатньо просто реалізується. Перед початком пошуку слід задати точку у просторі невідомих коефіцієнтів, з якої почнеться пошук. Часто точка береться навмання в допустимих межах для значень фактору. Далі алгоритм починає шукати мінімум цільової функції, шляхом зміни лише однієї координати. Після визначення мінімуму по цій координаті починається пошук мінімуму по наступній координаті і т. ін. Після того, як значення цільової функції перестануть покращуватися при переході від однієї координати до іншої, пошук закінчується. У випадку моделі, що представлена формулою (1), пошук будемо проводити спочатку по сталому рівню перехідного процесу ($q_{\text{ст}}$), потім по його тривалості (tau), потім знов по сталому рівню і т. ін. Таким чином, реалізація пошук по декількох координатах потребує реалізації пошуку по одній координаті.

Алгоритм пошуку в напрямку градієнта. Так само як і в попередньому випадку, алгоритм потребує налаштування базової точки в просторі пошуку, з якої почнеться пошук. Далі складається матриця планування повного або дробового факторного експерименту на двох рівнях. Наприклад, для моделі перехідного процесу за формулою (4) матриця планування експериментів буде мати вигляд, який представлено в табл. 1.

Таблиця 1 – Матриця планування експериментів для отримання координат вектора градієнта для моделі перехідного процесу за формулою 4

Номер експерименту	k1 ($q_{\text{ст}}$)	k2 (tau)	k3 (dely)
1	+	+	-
2	+	-	+
3	-	+	+
4	-	-	-

Джерело: Розроблено авторами

Відповідно до цього плану проводиться серія експериментів. Отриману в результаті проведених експериментів інформацію використовують для обчислення координат вектора градієнта, який визначає напрям найбільшого збільшення (зменшення) цільової функції.

У напрямку, заданому цим вектором, проводять одно факторний експеримент, визначаючи оптимальне значення функції відгуку на лінії градієнта.

Точка, отримана таким чином, береться за базову точку, і для неї знову планується серія експериментів на двох рівнях.

Якщо значення функції відгуку в усіх точках плану виявилися гіршими, ніж в базовій точці, то це означає що, оптимум досягнутий. В іншому випадку проводиться нова серія експериментів по визначенню напрямку найбільшої зміни функції відгуку.

Алгоритм пошуку екстремуму по одній координаті. Розглянуті алгоритми переводять пошук екстремуму в багатовимірному просторі у пошук екстремуму по одній координаті. Тож тепер треба визначитися з алгоритмом реалізації такого пошуку.

Найбільш відомими методами пошуку екстремуму по одній координаті є методи дихотомії, чисел Фібоначчі, золотого перетину. Найпростіший з них – це метод дихотомії, але він, у порівнянні з двома іншими потребує більшої кількості тестів для прийняття рішення. Основна перевага методів Фібоначчі та золотого перетину полягає в тому, що на кожному кроці використовуються дані попереднього кроку, що скорочує число експериментів. Методи золотого перетину практично не відрізняються по ефективності, але у випадку дискретизації процесу пошуку, числа Фібоначчі використовувати зручніше. Тому будемо використовувати метод чисел Фібоначчі.

Для вирішення поставленого завдання пошуку оптимального значення цільової функції, перш за все, задається точність, з якою потрібно визначити невідомий параметр. Цю величину називатимемо мінімальним кроком пошуку. Потім визначаються границі області пошуку, всередині якої знаходиться екстремум. Далі починається сам пошук.

Перший етап алгоритму пошуку границь – це визначення напрямку руху. Обчислюється значення цільової функції в стартовій точці і на відстані кроку від неї. Якщо значення цільової функції збільшується, то крок робиться в протилежному напрямку. Якщо і тут значення цільової функції збільшується, то пошук закінчено. В іншому випадку стає відомим напрямок пошуку, який задається знаком кроку зміни параметра.

Другий етап полягає у визначенні другої границі області пошуку. Відстань від початкової точки до точки, де проводиться експеримент, поступово збільшується з кожним новим кроком пропорційно числам Фібоначчі, а ліву границю переносять у точку, де був попередній експеримент. Етап закінчується, коли цільова функція починає зростати. Важливо, що інтервали між точками у визначеній області, де проводилися експерименти, відповідають послідовності чисел Фібоначчі.

Останній етап реалізує пошук точки екстремуму всередині визначеної області. Область пошуку поступово звужується, але її ширина і відстані між точками, де проводяться експерименти, у будь-якому випадку дорівнюють числу Фібоначчі. Поки відстань між точками, в яких проводяться експерименти, більше одиниці, процес повторюється. В іншому випадку в області пошуку обирається точка з мінімальним значенням цільової функції, яка і буде точкою оптимуму.

Метод найменших квадратів. Цей метод можна застосувати для моделей, які представляють собою лінійну суперпозицію функцій фактора з ваговими коефіцієнтами, які є невідомими коефіцієнтами функції регресії, формула 11.

$$f = a1*\varphi1(x)+a2*\varphi2(x)+...+aN*\varphi N(x), \quad (11)$$

де $\varphi1(x), \varphi2(x), ..., \varphi N(x)$ – вибрані довільні функції від значень фактора, $a1, a2, ..., aN$ – невідомі коефіцієнти що визначають вигляд лінії регресії.

Серед розглянутих моделей такою є тільки формула 5. В цьому випадку у програмі достатньо запрограмувати розрахунки цих функцій та застосувати стандартні програми вирішення систем лінійних рівнянь.

Програмна реалізація підсистеми. Розглянуті алгоритми пошуку було реалізовано мовою програмування Java. Для стандартизації їх використання було створено інтерфейс IFinderRegresParm, який визначає протокол спілкування з об’єктами, які забезпечують пошук оптимальних параметрів математичних моделей перехідного процесу, незалежно від конкретної реалізації алгоритму пошуку коефіцієнтів та їх кількості. Для реалізації цього інтерфейсу було розроблено ієрархію класів, яку представлено на рисунку 5.

Інтерфейс IFinderRegresParm передбачає реалізацію методів, які вирішують наступні завдання:

– передачу сукупності даних про результати експериментів через методи setFactorArray(Double[]) та setValueArray(Double[]). Для цих масивів передбачені також гетери;

– доступ до результатів надає метод getParmArray(), який повертає оптимальні значення параметрів у вигляді масиву;

– доступ до методу funcRegres(double, double[]), що дозволяє розрахувати значення функції перехідного процесу для заданого значення фактора і масиву параметрів функції регресії;

– виведення переліку параметрів регресії у вигляді тексту за допомогою методу parametersAsString().

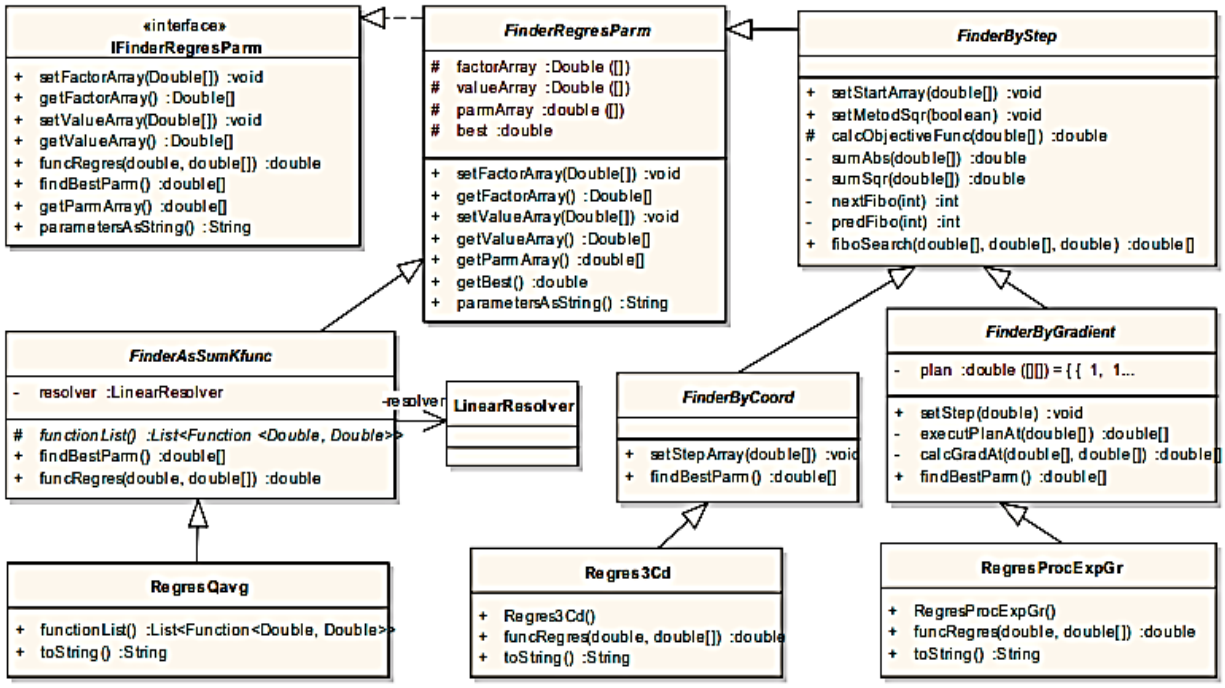


Рис. 5. Діаграма класів підсистеми БППППФР

Джерело: розроблено авторами.

Абстрактний клас FinderRegresParm містить поля для збереження вихідних експериментальних даних, результатів їх обробки та реалізації методів доступу до цих полів. Поле factorArray містить масив значень фактора, поле valueArray містить значення функції відгуку. Поле parmArray містить масив параметрів функції регресії, а поле best – оптимальне значення функції регресії. У класі також реалізовано метод parametersAsString(), в якому використовується метод getParmArray().

Абстрактний клас FinderAsSumKfunc реалізує загальні питання знаходження оптимальних параметрів функції регресії, якщо вона має вигляд формули 11. Абстрактний метод functionList<Function <Double,Double>> повертає список функцій *φ1(x), φ2(x), …, φN(x)*, які мають бути представлені у вигляді лямбда функцій і має бути реалізованим у класі спадкоємці. Клас також реалізує метод funcRegres(), в якому розраховуються значення функції регресії за формулою 11 з використанням функцій, що повертає метод functionList(). Метод findBestParm() формує і вирішує систему лінійних рівнянь для пошуку оптимальних коефіцієнтів функції регресії. Для розв’язку системи рівнянь використовується клас LinearResolver.

Клас RegresQavg успадковує клас FinderAsSumKfunc і являє собою конкретну реалізацію інтерфейсу IFinderRegresParm. Він дозволяє знайти оптимальний параметр функції регресії для залежності середньої довжини черги від коефіцієнта завантаження, яка визначається формулою 5. Цю формулу реалізовано у методі functionList(). Метод toString() повертає текстове представлення цієї формули.

Абстрактний клас FinderByStep реалізує загальні питання знаходження оптимальних параметрів функції регресії за допомогою чисельних методів пошуку, які не залежать від алгоритму пошуку.

Метод setStartArray(double[]) задає масив з координати стартової точки пошуку. Розмір цього масиву визначає кількість параметрів функції 11.

Метод setMetodSqr(boolean) дозволяє вибрати варіант цільової функції. Якщо параметр методу дорівнює true, то цільовою функцією буде сума квадратів, інакше сума модулів відхилень експериментальних точок від відповідних значень лінії регресії. Відповідні розрахунки реалізовано в приватних методах sumAbs(double[]) та sumSqr(double[]).

Сама цільова функція обчислюється за допомогою метода calcObjectiveFunc(double[]), куди передаються поточні значення параметрів функції регресії.

Метод fiboSearch(double[], double[], double) використовується для пошуку екстремуму цільової функції в одновимірному просторі, згідно з алгоритмом, який було описано вище. Перший параметр методу задає координати стартової точки. Другий параметр задає координати вектора градієнта, який визначає напрямок пошуку. Третій параметр задає початковий крок пошуку. Метод повертає масив з координатами точки оптимуму в заданому напрямку. Маніпуляції з числами Фібоначчі, які використовуються в алгоритмі, забезпечують приватні методи nextFibo(int) та predFibo(int).

Абстрактний клас FinderByGradient є спадкоємцем класу FinderByStep і реалізує градієнтний метод пошуку оптимальних параметрів функції регресії.

Метод setStep (double) визначає розмір мінімального кроку пошуку в напрямку градієнта, який зберігається у полі step.

Метод findBestParm() є реалізацією відповідного методу інтерфейсу IFinderRegres(). В методі реалізовано алгоритм пошуку екстремуму градієнтним методом, відповідно до алгоритму, описаного вище. Для пошуку в напрямку градієнта використовується метод fiboSearch() суперкласу FinderByStep.

Метод executePlan(double[]) розраховує значення цільової функції в точках плану проведення багатофакторного експерименту на двох рівнях. План проведення експерименту зберігається в полі plan.

Метод findGradient(double[]) розраховує координати вектора градієнта для заданої точки.

Клас RegresProcExpGR – це один із низки класів, що успадковують клас FinderByGradient і являють собою конкретні реалізації інтерфейсу IFinderRegresParm. Клас забезпечує пошук оптимальних параметрів функції регресії для перехідного процесу, яка визначається формулою 1. Цю формулу реалізовано у методі funcRegres(). У конструкторі класу налаштовуються усталені значення координат початкової точки пошуку та значення розміру кроку пошуку. Метод toString() повертає текстове представлення цієї формули.

Абстрактний клас FinderByCoord є спадкоємцем класу FinderByStep і реалізує пошук оптимальних параметрів функції регресії методом координатного спуску. Метод setStepArray(double[]) визначає значення розмірів кроків пошуку за координатами, які зберігаються у масиві stepArray. Метод findBestParm() є реалізацією відповідного методу інтерфейсу IFinderRegres(). В методі реалізовано алгоритм пошуку екстремуму методом координатного спуску. Для пошуку по кожній координаті використовується метод fiboSearch() суперкласу FinderByStep. Координата, по якій проводиться пошук, визначається наявністю одиниці в одному з елементів масиву градієнта.

Клас Regres3Cd являє собою одну із конкретних реалізацій інтерфейсу IFinderRegresParm, яка отримана шляхом успадкування класу FinderByCoord. Він дозво-

ляє знайти оптимальні параметри функції регресії для залежності сталої часу перехідного процесу від коефіцієнта завантаження системи , яка визначається формулою 8. Цю формулу реалізовано у методі funcRegres(). У конструкторі класу налаштовуються усталені значення координат початкової точки пошуку та значень розміру кроків пошуку по координатам. Метод toString() повертає текстове представлення цієї формули.

Проблема локальних екстремумів. В процесі пошуку адекватної лінії регресії для залежності параметрів перехідного процесу від коефіцієнта завантаження з'ясувалося, що для деяких функцій регресії можна отримати різні значення оптимальних параметрів, якщо змінювати координати стартової точки. Зокрема це відбувалося з пошуком параметрів лінії регресії, яка визначалася формулою (8). Для вирішення цієї проблеми було створено клас Regres3CdGr, який напряму успадковував клас FinderByStep і використовував класи Regres3Cd і Regres3Gr, які відповідно успадковували класи FinderByCoord та FinderByGradient.

Відповідна діаграма класів наведена на рис. 6.

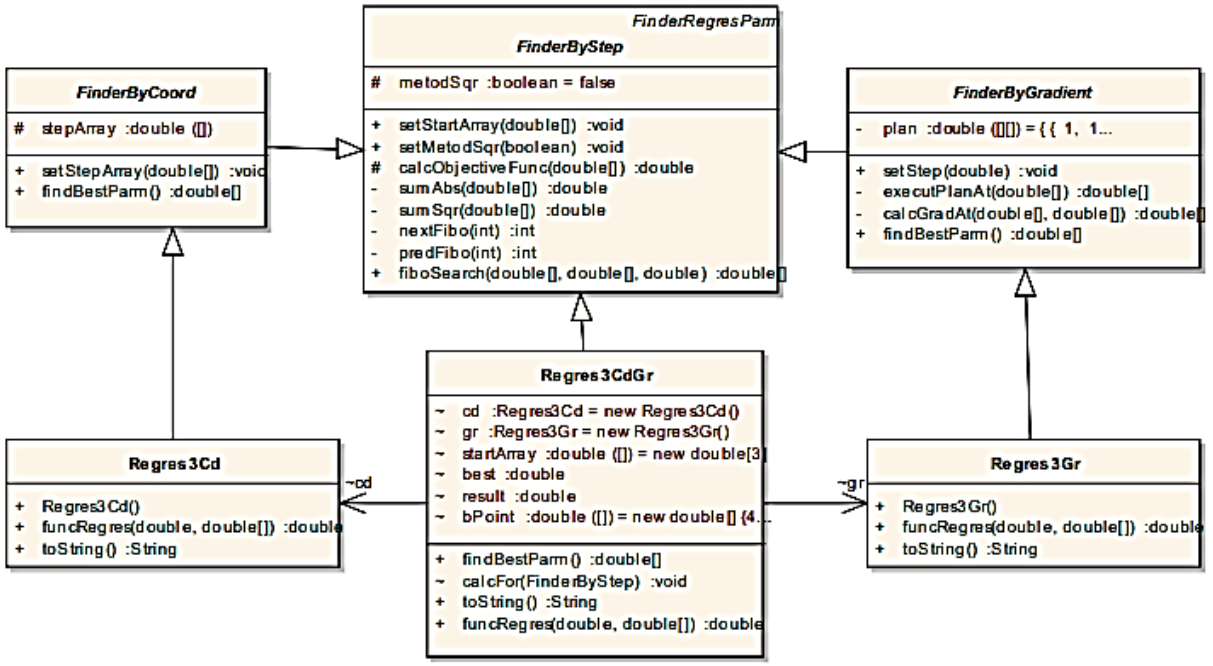


Рис. 6. Діаграма класів що реалізують пошук у випадку цільової функції з багатьма локальними екстремумами

Джерело: розроблено авторами.

Гібридний метод цього класу findBestParm поєднує методи координатного та градієнтного спуску з принципами генетичного алгоритму. У методі реалізовано прямий перебір координат стартових точок в діапазоні від 0.25 до 1.75 значень координат базової точки з кроком 0.1 значення координати. У кожній з точок пошук проводився як методом координатного спуску, так і градієнтним методом. У процесі перебору знаходилася точка, у якій значення цільової функції було найменшим. Після завершення циклу перебору знайдена точка ставала базовою і процес повторювався, поки новий цикл перебору давав кращий результат. Експерименти показали, що вибір початкової точки не впливав на результати пошуку параметрів функції регресії за допомогою цього класу. Попри велику кількість звертань до методу findBestParm (близько 7000 за один цикл перебору) пошук закінчувався достатньо швидко, у межах секунди.

Тестування класів. У класах FinderAsSumKfunk, FinderByCoord та FinderByGradient є методи main(), які дозволяють протестувати роботу об'єктів класів. У цих методах створюється об'єкт анонімного класу, який реалізує деяку функцію регресії. Далі генерується масив факторів і за допомогою створеного об'єкта генерується масив значень функції відгуку. Після цього задається деяка стартова точка й запускається процес пошуку. Результати тестування виводяться на консоль.

Висновки. У роботі запропоновано архітектуру багатофункціональної підсистеми оцінювання параметрів функції регресії, яку реалізовано мовою програмування Java. Ця підсистема призначена для інтеграції в систему дослідження перехідної поведінки СМО засобами імітаційного моделювання.

Зокрема, проаналізовано різновиди математичних моделей для функцій регресії, які можуть використовуватися в такій системі, а також розглянуто методи та алгоритми пошуку оптимальних параметрів цих функцій.

Архітектура підсистеми побудована як багаторівнева ієрархія класів із застосуванням єдиного інтерфейсу. Кінцевими (конкретними) класами цієї ієрархії є класи, що визначають специфічну модель функції регресії та відповідний метод пошуку.

Використання БППППФР у системі імітаційного моделювання дозволило спростити її архітектуру та підтвердило працездатність запропонованого підходу. Підсистема також може бути успішно використана в інших програмних платформах імітаційного моделювання.

Список використаних джерел

1. Cox, D. R., & Reid, N. (2000). *The theory of the design of experiments*. Chapman & Hall/CRC.

2. Літнарович, Р. М. (2011). *Побудова і дослідження математичної моделі за джерелами експериментальних даних методами регресійного аналізу : навчальний посібник*. МЕГУ.

3. Горват, А. А., Молнар, О. О., & Міньковіч, В. В. (2019). *Методи обробки експериментальних даних з використанням MS Excel: Навчальний посібник*. Видавництво УжНУ «Говерла».

4. Maxfield, B. (2006). *Engineering with Mathcad: Using Mathcad to create and organize your engineering calculations*. Butterworth-Heinemann.

5. Кісельова, О. М., & Шевельова, А. Є. (2008). *Чисельні методи оптимізації: Навчальний посібник*. Вид-во ДНУ.

6. Касіцький, О. В. (2012). Метод покоординатного спуску з евристикою середньозваженого напрямку. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*, (1(81)), 69–75.

7. Sebastian, R. (2016). *An overview of gradient descent optimization algorithms*. arXiv. https://arxiv.org/abs/1609.04747.

8. Бивойно, П. Г., Бивойно, Т. П., & Сисоєва, М. М. (2011). Дослідження перехідних процесів для середньої довжини черги в системах масового обслуговування. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»,* (1(47)), 235–241.

References

1. Sokh, D. R., & Reid, N. (2000). *The Theory of the Design of Experiments*. Chapman & Hall / CRC.

2. Litnarovych, R. M. (2011). *Pobudova i doslidzhennia matematychnoi modeli za dzherelamy eksperymentalnykh danykh metodamy rehresiinoho analizu [Construction and study of a mathematical model based on experimental data sources using regression analysis methods: A study guide]*. MEHU.

3. Horvat, A. A., Molnar, O. O., & Minkovych, V. V. (2019). Metody obrobky eksperymentalnykh danykh z vykorystanniam MS Excel [Methods of experimental data processing using MS Excel: A study guide]. Uzhhorod: Vydavnytstvo UzhNU "Hoverla". (in Ukrainian).

4. Maxfield, B. (2006). *Engineering with Mathcad: Using Mathcad to create and organize your engineering calculations*. Butterworth-Heinemann.

5. Kiselova, O. M., & Shevelova, A. Ie. (2008). *Chyselni metody optymizatsii [Numerical optimization methods: A study guide]*. DNU Publishing House.

6. Kasitskyi, O. V. (2012). Metod pokoordynatnoho spusku z evrystykoiu serednozvazhenoho napriamku [Coordinate-by-coordinate descent method with weighted average direction heuristics]. *Naukovi visti NTUU «KPI» – Scientific News of NTUU "KPI"*, (1(81)), 69-75. (in Ukrainian).

7. Ruder, S. (2016). An overview of gradient descent optimization algorithms. arixv:1609.04747. Accessed 05 Feb 2020.

8. Byvoino, P. H., Byvoino, T. P., & Sysoieva, M. M. (2011). Doslidzhennia perekhidnykh protsesiv dlia serednoi dovzhyny cherhy v systemakh masovoho obsluhovuvannia [Study of transient behavior for average queue length in queueing systems]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Seriia «Tekhnichni nauky» – Bulletin of Chernihiv State Technological University. Series "Technical Sciences"*, (1(47)), 235–241.

Дата першого надходження статті до видання: 19.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 08.01.2026

UDC 004.94

***Taras Byvoino*[1], *Pavel Byvoino*[2]**

[1]Senior Lecturer, Department of Information Technologies and Software Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: tbivoyno@gmail.com. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0001-6914-5441. **ResearcherID**: B-7478-2017

[2]PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Information and Computer Systems
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: p.g.byvoino@gmail.com. **ORCID**: https://orcid.org/0000-0001-8145-8459. **ResearcherID:** R-7447-2016

ARCHITECTURE AND SOFTWARE IMPLEMENTATION OF METHODS FOR OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF REGRESSION FUNCTIONS (IN CONDITIONS OF LOCAL EXTREMES) USING A HYBRID APPROACH

Presented in the article information is of scientific and methodical character. This paper presents the development of a subsystem designed for regression parameter estimation. The subsystem is an integral part of a simulation environment used to study transient behavior in Queueing Systems (QS).

While the problem of determining regression function parameters for experimental data representation is well-established and supported by numerous tools, integrating such functionality into a specialized, multifunctional simulation system remains a challenge. Such integration is essential for systems that combine simulation experiments for both parameter identification and analyzing the impact of QS configurations on transient behavior .

The authors consider mathematical models with several unknown parameters to represent simulation results; however, in most cases, the least squares method cannot be employed due to the specific nature of the regression functions.

The proposed architecture system incorporates various numerical optimization methods tailored to the selected mathematical model. In particular, a novel specific method was implemented, combining coordinate and gradient descent techniques with genetic algorithm principles. This hybrid approach enables overcoming the problem of local extrema inherent in some models.

Access to all methods for estimating optimal regression parameters is provided through a unified interface that establishes a consistent protocol for interaction and ensures the extensibility of the system for new regression functions. To support this architecture, an appropriate class hierarchy was developed. The concrete classes within this hierarchy define specific regression models and their respective search algorithms.

The integration of the developed subsystem into the simulation environment for studying transient processes in QS has simplified the system architecture and confirmed its practical viability. Given its design, the subsystem can be effectively utilized in other simulation platforms.

***Keywords**: regression parameter estimation; numerical parameter identification; simulation modeling; queueing systems (QS); hybrid optimization algorithm; object-oriented software architecture.*

Fig.: 6. References: 8.

Бивойно Т. П., Бивойно П. Г. Архітектура та програмна реалізація методів оптимізації параметрів функцій регресії (в умовах локальних екстремумів) з використанням гібридного підходу. *Технічні науки та технології,* 2026. № 1(43). С. 149-160. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-149-160.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-161-182
УДК: 004.942

Владислав Дмитрович Байда[1], Олександр Анатолійович Велігорський[2]

[1]аспірант кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національного університету «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: Vladyslav.Baida@stu.cn.ua. **ORCID**: https://orcid.org/0009-0004-2172-8057
Google Scholar: https://scholar.google.com/citations?user=J8RjmHwAAAAJ

[2]професор кафедри електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки
Національного університету «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: o.veligorskiy@stu.cn.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-8256-7339
Google Scholar: https://scholar.google.com.ua/citations?user=SWbfGzQAAAAJ

РОЗРОБКА ТА ПРАКТИЧНА ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ДІАГНОСТИКИ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НА ОСНОВІ ФІЗИЧНО-ОРІЄНТОВАНИХ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ

У статті представлено результати практичної імплементації методології діагностики апаратного забезпечення на основі технології цифрового двійника для перетворювачів постійного струму. За допомогою PySpice розроблено модель понижуючого перетворювача, що враховує паразитні параметри компонентів. Сформовано таблицю відповідності впливу відхилень параметрів схеми на вихідні показники через моделювання шести ступенів відносних змін. Валідація на базі 6705 експериментальних вимірювань у системі дистанційної лабораторії на базі Lab Discovery Engine показала 100 % ефективність виявлення відмов та 85,1–100 % точність ідентифікації їхніх причин. Запропонований підхід забезпечує перехід від реактивного до проактивного обслуговування систем силової електроніки.

Ключові слова: *цифровий двійник; інформаційна технологія; кіберфізична система; діагностика апаратного забезпечення; прогностичне обслуговування; силова електроніка; моделювання.*

Рис.: 3. Табл.: 16. Бібл.: 32.

Актуальність теми дослідження. Надійність силової електроніки є критичним фактором у сучасних енергетичних системах, оскільки несподівані відмови DC-DC перетворювачів можуть призвести до значних економічних втрат та порушення функціонування критичних систем [1; 2]. Надійність цих імпульсних перетворювачів потужності безпосередньо впливає на доступність системи, безпеку та експлуатаційні витрати [3].

Незаплановані відмови обладнання коштують промисловості сотні мільярдів доларів щорічно. За даними дослідження [4] великих міжнародних промислових компаній, виробники з Fortune Global 500 у 2021-2022 роках втрачали близько $1,5 трильйона щорічно через простої обладнання, що становило 11 % їхніх річних доходів. За два роки до того, у 2019-2020 загальні втрати були $864 мільярди (або ж 8 % річних доходів), що вказує на тенденції до зростання. Це ж дослідження вказує, що ціна за втрачені через простої, сягає в середньому $39 тисяч за годину, а для автомобільної сфери становить більш ніж $2 мільйони за годину. Ці цифри демонструють масштаб економічних втрат, які можна суттєво знизити через впровадження ефективних діагностичних систем.

Раннє виявлення та діагностика несправностей дозволяє перейти від реактивного до проактивного обслуговування, значно знижуючи витрати на експлуатацію та підвищуючи загальну надійність систем [1; 5]. Останні досягнення в області технології цифрових двійників у поєднанні із сучасними методами діагностики створили нові можливості для моніторингу стану, виявлення несправностей та профілактичного технічного обслуговування апаратного забезпечення.

DC-DC перетворювачі, зокрема buck converter (понижуючий перетворювач), широко використовуються в живленні електронних пристроїв, електромобілях, фотоелектричних системах та системах накопичення енергії [6; 7]. Ці пристрої працюють в умовах значних електричних та теплових навантажень, що призводить до поступової деградації компонентів [5]. Основні та найбільш поширені типи несправностей включають в себе обриви та короткі замикання силових ключів (open-circuit та short-circuit faults), деградацію конденсаторів (зростання еквівалентного послідовного опору ESR та зменшення ємності),

© В. Д. Байда, О. А. Велігорський, 2026

збої датчиків струму та напруги, а також параметричні відхилення індуктивних елементів [8]. Дослідження [9] показує, що інвертори та перетворювачі становлять 27 % відмов у вітрових турбінах на суші, 28 % відмов у сонячних фотоелектричних системах та 12 % відмов в електромобілях.

Багато з сучасних підходів діагностики електронного обладнання мають суттєві обмеження. ***Сигнальні методи діагностики***, хоч і забезпечують швидке виявлення несправностей (сотні наносекунд), страждають від складності налаштування та високої чутливості до завад [10]. ***Модельно-орієнтовані*** підходи демонструють кращу точність, але потребують детальних знань про систему [5] та складні системи не просто моделювати [11]. ***Методи машинного навчання*** досягають високої точності (95-99 %), проте вимагають великих обсягів навчальних даних та мають характер чорного ящика (black box), що обмежує їхнє застосування в критично важливих системах [12].

Технологія ***цифрових двійників*** (digital twins) є перспективною для діагностики апаратного забезпечення, що поєднує в собі переваги моделювання з можливостями аналізу даних у реальному часі. Систематичне дослідження 167 публікацій [13] показало, що застосування цифрових двійників для прогностичного обслуговування та управління станом (PHM) зросло експоненційно з 2018 року. При цьому 94 % досліджень використовують фізичні дані, а 34 % – віртуальні дані (сума більша за 100 %, тому що деякі дослідження використовували обидва типи даних).

Постановка проблеми. Діагностика апаратного забезпечення силової електроніки загалом, а також перетворювачів постійного струму зокрема, має декілька проблем.

По-перше, існуючі ***сигнальні методи*** діагностики мають суттєві обмеження щодо застосовності та надійності. Ці методи часто вимагають додаткових датчиків або діагностичних схем, що збільшує вартість впровадження. Крім того, алгоритми, розроблені для конкретних топологій конвертерів, важко або навіть неможливо екстраполювати на інші типи перетворювачів без повторного аналізу механізмів роботи та коригування моделі. Сигнальні методи також схильні до помилкових спрацювань при роботі в динамічних умовах зі значними частотами перемикання або коливаннями навантаження [14]. ***Модельно-орієнтовані алгоритми*** потребують детальних знань про систему та зазвичай базуються на рівняннях паритету, генерації нев'язок через оцінку параметрів або спостерігачі стану, що ускладнює їх застосування при зміні конфігурації системи [14].

Для buck-перетворювачів проблема діагностики ускладнюється множинністю потенційних режимів відмов. Наприклад, дослідження [15] показує, що окрім відмов на рівні компонентів (MOSFET, діод, конденсатор тощо), відмови можуть відбуватися на рівні сенсорів (обрив, відхилення коефіцієнтів підсилення сенсорів, сильні завади). Вихідні конденсатори являються найбільш критичними компонентами з погляду надійності, а деградація їх ESR (еквівалентного послідовного опору) з часом та температурою може призвести до нестабільності вихідної напруги [16].

Особливо проблематичними є "м'які відмови" (soft faults) – поступова деградація параметрів компонентів, яка впливає на функціональність та надійність системи, але не призводить до миттєвого відключення. Автори підкреслюють, що на відміну від "жорстких відмов" (hard faults), які характеризуються раптовими структурними пошкодженнями (коротке замикання, обрив), м'які відмови являють собою поступову деградацію компонентів під впливом тривалої експлуатації та різноманітних факторів навколишнього середовища. Особливо важливим є спостереження дослідників, що з удосконаленням виробничих технологій електронні компоненти отримали значно довший термін служби, внаслідок чого м'які відмови стали домінуючим типом несправностей у системах. Це означає, що традиційні методи діагностики, орієнтовані на катастрофічні відмови, виявляються неефективними для сучасних високонадійних систем. Водночас втручання на

ранніх стадіях було б найбільш ефективним. Дослідження з використанням контрастного навчання для виявлення м'яких відмов у buck-перетворювачах показує, що деградація параметрів компонентів під впливом навколишнього середовища вимагає нових підходів. Основні механізми деградації ключових компонентів buck-boost перетворювачів це зменшення ємності та збільшення опору електролітичних конденсаторів, а також зменшення індуктивності та збільшення опору котушок індуктивності [17]. На відміну від таких повільних відмов, більшість існуючих підходів до діагностики в перетворювачах постійного струму зосереджені на раптових (катастрофічних) відмовах, зокрема коротких замиканнях (SCF) та обривах кола (OCF) у напівпровідникових ключах і діодах. Як показано у [14; 18], сучасні методи діагностики забезпечують майже стовідсоткову точність у виявленні таких жорстких збоїв, проте їхня ефективність істотно знижується у випадку поступових параметричних змін.

Робота [14] демонструє, що більшість алгоритмів побудовано навколо аналізу сигнатур струму або напруги й забезпечують реакцію протягом одного-двох періодів комутації, що робить їх ефективними для швидких відмов, але непридатними для повільної деградації елементів, таких як зростання ESR конденсаторів чи дрейф значень індуктивності. Хоча в окремих роботах описано спроби моніторингу стану компонентів — наприклад, оцінювання ESR конденсатора за допомогою датчика Роговського або використання модельно-орієнтованих алгоритмів для оцінки параметрів у реальному часі, автори наголошують, що такі методи потребують значних обчислювальних ресурсів і поки що рідко застосовуються на практиці.

Проблема посилюється вимогами до діагностики у реальному часі з обмеженими обчислювальними ресурсами. Огляд методів виявлення несправностей у перетворювачах виявив, що сигнальні методології забезпечують швидку ідентифікацію несправностей, але з помітною складністю налаштування; модельно-орієнтовані методології дещо повільніші, але ефективніші з простішим налаштуванням, а методології на основі даних мають вищу точність, проте збільшену обчислювальну складність [10]. Для промислового застосування необхідний баланс між цими аспектами.

Дослідження Узагальнення Доменів (Domain Generalization) для діагностики апаратного забезпечення виявляють фундаментальну проблему: алгоритми діагностики несправностей на основі глибокого навчання сильно покладаються на припущення, що тренувальні та тестові дані є незалежними та однаково розподіленими (independent and identically distributed). Як зазначено у статті [19], алгоритми діагностики несправностей на основі глибокого навчання сильно покладаються на надспрощене припущення, що тренувальні (вихідний домен) та тестові (цільовий домен) дані є незалежними та однаково розподіленими. Коли це припущення порушується, вивчені діагностичні знання важко узагальнити на невидимі умови роботи обладнання. У реальних промислових сценаріях варіювання робочих умов, існування шумів у даних та відмови вимірювального обладнання неминуче впливають на розподіл даних. Коли алгоритм глибокого навчання стикається з даними поза розподілом вихідного домену, моделі часто зазнають значного погіршення продуктивності через “зсув домену”.

Також існує проблема генералізації методів діагностики. Більшість існуючих досліджень зосереджені на конкретних топологіях перетворювачів і специфічних режимах роботи. Навчена модель машинного навчання для buck converter з конкретними параметрами потужності часто демонструє значне зниження точності при застосуванні до інших конфігурацій. Тільки 2 з 11 досліджених методів верифіковано на різних потужностях та топологіях без необхідності повторного навчання. Цифрові двійники частково вирішують цю проблему через фізично обґрунтовану нормалізацію параметрів, але потребують початкового калібрування під кожну систему [18].

Критичною є також проблема інтерпретованості. У критично важливих застосуваннях «чорноскринькова» природа моделей глибокого навчання викликає занепокоєння щодо надійності, особливо коли модель не може надати міру невизначеності для своїх діагностичних рішень.

Огляд викликів модельно-орієнтованої діагностики [20] виявляє, що попри 40+ років використання, ця область продовжує стикатися з численними науковими викликами: обробка складних систем, управління невизначеністю, обчислювальна здатність для великомасштабних кіберфізичних систем та вимоги до діагностики у реальному часі.

Таким чином, основна проблема полягає у необхідності створення інтегрованої методології діагностики, яка б:

1) Забезпечувала високу точність виявлення різноманітних типів несправностей;
2) Функціонувала у реальному часі з обмеженими обчислювальними ресурсами;
3) Адаптувалася до зміни параметрів та умов експлуатації;
4) Була достатньо узагальненою для застосування до різних конфігурацій buck-перетворювачів і не тільки;
5) забезпечувала інтерпретованість діагностичних рішень для критично важливих застосувань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що останнє десятиліття характеризується інтенсивним розвитком трьох взаємопов'язаних напрямків досліджень: технології цифрових двійників, методів діагностики силової електроніки та специфічних підходів до моніторингу перетворювачів постійного струму. Розглянемо ключові досягнення в цих областях.

Цифрові двійники для діагностики та моніторингу. Деякі фундаментальні роботи із систематизації застосувань цифрових двійників для моніторингу несправностей були опубліковані протягом 2023-2024 років. У роботі [21] представлено всебічний огляд технології цифрових двійників для моніторингу несправностей. Там показано, що цифровий двійник вирішує обмеження традиційних методів у відображенні складних взаємодій системи. Важливість цього напрямку підтверджує систематичний огляд 167 публікацій про цифрові двійники для прогностичного обслуговування [13], який виявив, що застосування розподілені наступним чином:

- виробництво 48 %;
- енергетика 30 %;
- інші галузі 22 %.

при чому домінуючим аспектом є виявлення несправностей.

Розвиток цифрових двійників у силовій електроніці систематизовано в оглядовій статті [22], яка аналізує понад 170 публікацій і визначає три ключові фази життєвого циклу застосування цифрових двійників: проєктування, управління та обслуговування. Цей огляд виявляє критичні виклики: суперечності між складністю та точністю моделі, необхідність точного відображення та безперервної взаємодії даних, проблеми масштабованості для таких архітектур.

Цифрові двійники для перетворювачів постійного струму. Пряме застосування цифрових двійників до перетворювачів постійного струму демонструють кілька робіт. Автори статті [7] розробили цифровий двійник для моніторингу та управління buck-перетворювачем, проте автори відкрито зазначають, що «діагностика стану системи та прогнозування» залишаються майбутньою роботою.

У статті [23] запропонували метод оцінки показників стану здоров'я перетворювачів постійного струму на основі цифрового двійника, який використовує оптимізацію роєм частинок (PSO) для ідентифікації параметрів схеми. Метод призначений для неінвазив-

ного моніторингу деградації ключових компонентів (конденсатора та MOSFET) без додаткових апаратних схем та вимог до калібрування. Цифровий двійник включає модель силової частини, схеми вимірювання та замкнутого контуру управління для точного відтворення поведінки реального перетворювача.

Ймовірнісні цифрові двійники в реальному часі. Цей підхід для діагностики апаратного забезпечення було представлено в роботі [24], де автори використали поліноміальне розкладання хаосу та побудовані на FPGA розв'язувачі математичних рівнянь моделі для моніторингу, при цьому система порівнює ймовірнісний цифровий двійник з фізичним для виявлення аномальної роботи.

Методи виявлення несправностей у силовій електроніці. Загальні огляди методів виявлення несправностей у силовій електроніці надають систематичний аналіз існуючих підходів. У роботі [14] представлено огляд діагностики та відмовостійкості для DC-DC перетворювачів з класифікацією методів на сигнальні, модельно-орієнтовані та тих, що базуються на штучному інтелекті. Огляд у [10] проаналізував понад 150 статей останнього десятиліття і встановив, що сигнальні методології забезпечують швидку ідентифікацію, модельно-орієнтовані – ефективне налаштування, а методології на основі даних – найвищу точність при збільшеній обчислювальній складності.

Огляд методів діагностики у трифазних інверторах [9] надає детальну класифікацію типів несправностей та методів виявлення. Для сигнальних методів час виявлення варіюється від 4 мс (перетворення Кларка) до 20 мс (спектрограма); для модельно-орієнтованих – від 0,91 мс (MRAS) до 4,96 мс (метод ковзного вікна); для методів на основі ШІ – від менш як 20 мс (нечітка логіка) до 46 мс (ШНМ). Розширений фільтр Калмана (EKF) виділяється як такий, що забезпечує чудові результати, швидке виявлення та адаптацію до змін системи.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Огляди виявляють відсутність стандартизованих архітектур цифрових двійників для силової електроніки [22] та розрив між доступними визначеннями цифрових двійників та вимогами для майбутніх енергетичних систем [25]. Бракує стандартизованих наборів даних для валідації діагностичних підходів та єдиних метрик продуктивності, які б дозволяли об'єктивне порівняння різних методологій.

Необхідною є уніфікація форматів даних, створення стандартизованих інтерфейсів для обміну інформацією між фізичним пристроєм та його віртуальним відображенням, а також розв'язання питань забезпечення кібербезпеки при такому двосторонньому обміні даними [26; 27].

Також створення цифрового двійника для складних електронних систем стикається з фундаментальною проблемою забезпечення оптимального балансу між точністю моделювання та швидкістю обчислень. Детальні мультифізичні моделі, що враховують електричні, теплові, механічні процеси та їх взаємний вплив, а також процеси старіння матеріалів, вимагають значних обчислювальних ресурсів і складно реалізовуються у реальному часі, тоді як спрощені моделі працюють швидше, але з меншою точністю [28].

У той самий час, відкритим залишається питання точного визначення критеріїв відмови та оцінки залишкового ресурсу (Remaining Useful Life, RUL) у межах функціонування цифрового двійника. Щоб цифровий двійник не лише виявляв дефекти на ранній стадії, але й передбачав момент відмови з достатньою точністю, необхідно встановити граничні значення параметрів, при досягненні яких слід вживати превентивних заходів [29].

Таким чином, для успішного впровадження технології цифрових двійників у сферу діагностики та прогностичного обслуговування апаратного забезпечення необхідні подальші дослідження в напрямках стандартизації, створення гібридних моделей оптимальної складності, розробки методів прогнозування за умов множинних механізмів деградації, та адаптації рішень для виконання на обмежених у ресурсах обчислювальних платформах.

Метою статті є впровадження на практиці методології діагностики апаратного забезпечення з використанням інформаційної технології цифрового двійника, описаної в роботі [30]. Ця методологія буде впроваджена в існуючій системі дистанційних лабораторій з вивчення перетворювачів постійного струму на прикладі buck та boost перетворювачів, що була розроблена в рамках проєкту Lab Discovery Engine (міжнаціональний суб-грант проєкту NGI Search від програми Horizon Europe HORIZON-CL4-2021-HUMAN-01).

Виклад основного матеріалу. Сформувати таблицю відповідності $\overline{E}$ до $\overline{R}$ можна декількома шляхами:

1. Експертним методом;
2. Експериментальним методом;
3. Методом математичного моделювання.

Експертний метод базується на тому, що поведінка типових схем (таких, як понижаючий перетворювач напруги) є добре дослідженою і передбачуваною. Тому людина, яка є експертом в області силової електроніки, може передбачити вплив змін вхідних значень на зміну вихідних, таким чином створивши таблицю відповідності власноруч. Такий підхід є швидким у використанні, не вимагає додаткового обладнання чи навичок програмування, але підвержений людському фактору, може бути занадто складним при аналізі комплексних змін входів, результат підходу складно довести без експерименту чи моделювання та з таким підходом може бути складно врахувати неідеальну поведінку реального апаратного забезпечення з паразитними елементами й нелінійностями, для більш складних схем обмежується поточним станом знань у відповідній сфері, а також цей підхід неможливо автоматизувати.

Експериментальний метод має на увазі почергову зміну вхідних значень на реальному пристрої з вимірюванням фактичних змін вихідних значень. Даний метод враховує всі властивості реального апаратного забезпечення, включаючи паразитні елементи і нелінійності, а також температурні залежності, може врахувати неочікувані залежності і поведінки, результати даного методу є максимально точними для конкретного обладнання, що досліджується, але він вимагає багато часу і ресурсів, обмежений ситуаціями, які фізично можливо відтворити, через особливості конкретної схеми може бути занадто прив'язаним до неї, через що його неможливо використовувати до інших подібних схем, а також підвержений помилкам у випадку дефектів конкретного електронного пристрою, який використовується для експериментів, має високий ризик пошкодження пристрою, складно автоматизується і відтворюється.

Метод математичного моделювання полягає у побудові математичної моделі електронного пристрою за допомогою програмних засобів. Такий метод є гнучким, може бути повністю автоматизованим за допомогою програмного забезпечення, дозволяє швидку перевірку багатьох конфігурацій і сценаріїв, надає відтворювані і прогнозовані результати, може бути швидко переробленим під інші конфігурації з мінімальними зусиллями, дозволяє легко візуалізувати залежності між входами і виходами, є безпечним для фізичних пристроїв, дозволяє легко протестувати крайові випадки, а також розроблена програмним шляхом математична схема може бути перевикористана в подальшому для реалізації алгоритму, але вимагає точної моделі, ігнорує частину реальних паразитних параметрів, вимагає спеціалізованого ПЗ і вміння роботи з ним, а також модель все рівно має бути підтвердженою шляхом порівняння поведінки з реальним екземпляром пристрою.

Для цієї статті було обрано метод математичного моделювання через відносну простоту схеми (а отже і простоту створення достатньо точної математичної моделі), необхідність візуалізації для побудови рисунків, а також через плани подальшого використання отриманої моделі в програмному забезпеченні, що детектує дефекти автоматично в ході експлуатації системи.

Створена математична модель слугує для двох цілей одночасно: створення таблиці відповідності та отримання вектора $\overline{Y}_2$ у процесі використання системи, що реалізує дану методологію.

Отже, постає необхідність у створенні такої математичної моделі, що буде легко інтегруватися в програмне забезпечення. Як технологія було обрано PySpice, яка являє собою бібліотеку мовою Python, яка реалізує інтерфейс до симуляторів електричних кіл Ngspice та Xyce на вибір. У нашій моделі використовується Ngspice.

Перетворювач постійного струму, що знижує напругу, який аналізувався в даній роботі, показано на рис. 1. Зображена схема є ідеальною, та ігнорує паразитні параметри, які мають свій вплив на залежність вихідних значень схеми від вхідних. Наявність паразитних параметрів в моделі дозволяє наблизити поведінку моделі до поведінки реального апаратного забезпечення. Під час попередніх експериментів з даною моделлю та порівняння її з експериментальним макетом перетворювача було виявлено, що така модель у PySpice (Ngspice) недостатньо точно відображає поведінку реального обладнання.

Як описано в роботі [31], модель має включати паразитні параметри, такі як: опір котушки індуктивності (DCR) RL, еквівалентний послідовний опір конденсатора (ESR) RC, паразитна індуктивність конденсатора LC тощо (рис. 2).

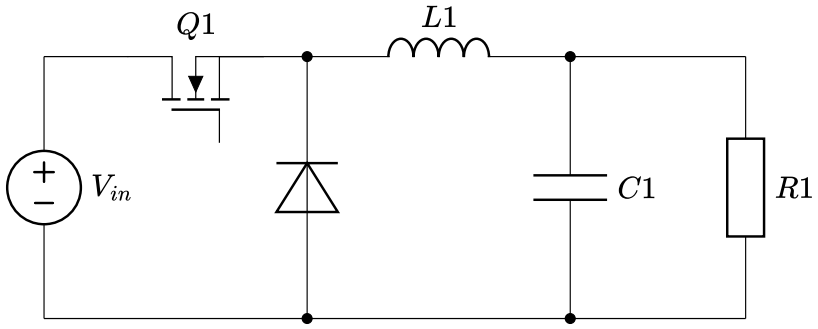


Рис. 1. Типова схема понижуючого перетворювача напруги

Джерело: розроблено авторами.

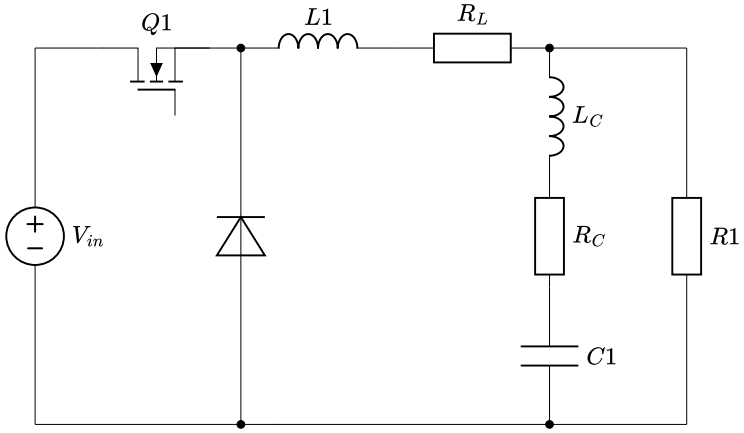


Рис. 2. Розширена схема електрична принципова перетворювача з деякими паразитними елементами

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 2 зображено схему, що включає в себе паразитні параметри для підвищення точності моделі. Отже, модель має наступні параметри: вхідна напруга V_{in}, коефіцієнт заповнення сигналу ШІМ D, індуктивність котушки L, ємність конденсатора C, опір навантаження R_{load}, опір конденсатора R_{C}, опір котушки R_{L}, опір діода R_{D}, опір відкритого транзистора R_{DSon}.

Для дослідження поведінки реального перетворювача було зроблено тривалий у часі збір даних через цифровий осцилограф, підключений до виходу перетворювача, а також до схеми вимірювання, що дозволяє перерахувати отриману напругу в струм індуктивності. Приблизно кожні дві секунди протягом більш ніж 4 години, робилися вимірювання цифровим осцилографом. Результатом є набір сигналів: напруги на ємності і струму через індуктивність у вказані моменти часу. Загалом було отримано 6705 таких вимірювань. У кожен з моментів вимірювання на входи перетворювача були подані одні й ті самі значення, а саме:

1. Вхідна напруга 12 В.
2. коефіцієнт заповнення 50 %.
3. Ємність конденсатора 44 мкФ.
4. Опір навантаження 3,8 Ом.

На основі цих даних можна робити аналіз поведінки схеми, такі як: середні значення напруги та струму, пульсації напруги та струму, а також статистику щодо діапазонів цих значень, наприклад значення найбільшої і найменшої пульсації напруги. Результати цього аналізу можуть слугувати для калібрування математичної (програмної) моделі, а також визначення параметра θ для реалізації методології. Статистичні дані щодо вибірки сигналів наявні в роботі [31].

Як можна бачити з наведеної вище таблиці, співвідношення між мінімальним і максимальним значеннями пульсацій напруги та пульсацій струму є досить високими (вище за 100 %), що зумовлено високим рівнем шумів та зазначеними вище проблемами зі схемою вимірювання. Такі умови є чудовими для тестування описаної в [30] методології, оскільки дозволять перевірити коректність її роботи на неточному обладнанні. Оскільки методологія працює з пороговим значенням θ, яке саме по собі є відносною величиною, то зниження співвідношення розбіжностей максимального і максимального значення показників є важливим для забезпечення більшої точності і надійності роботи алгоритму.

У табл. 8 роботи [31] наведено максимальні відхилення чотирьох показників у відсотках, які використані в таблиці 1 як «базове значення θ». Очевидно, що наявний набір виміряних сигналів не надає гарантії, що він містить найбільш великі або низькі можливі значення кожного з чотирьох показників, то доцільно закласти запас для значень θ. Як запас було вирішено додати 20 % до кожного зі значень θ, а отже результуючі θ мають значення, наведені в табл. 8.

Таблиця 1 – Отримані значення θ та значення з запасом

Показник	Базове значення θ	Значення θ з запасом (базове * 1.2)
Середня напруга	4,45	5,34
Пульсація напруги	41,69	50,03
Середній струм	11,63	13,96
Пульсація струму	42,25	50,7

Джерело: розроблено авторами.

Створення таблички відповідності методології. Всі характеристики компонентів схеми перетворювача, включаючи паразитні, являються вхідними значеннями схеми з погляду методології. Деякі з характеристик закладаються на етапі проєктування і не є змінними під час експлуатації пристрою. А деякі з них, наприклад коефіцієнт заповнення

сигналу ШІМ, легко піддаються зміні. У цій роботі не аналізується f_{PWM} як вхідне значення через нетривіальність порівняння результатів симуляцій двох моделей, значення f_{PWM} яких сильно відрізняється.

Таким чином, вектор вхідних значень має наступний вигляд:

$\overline{X} = [V_{in}, D, L, C, R_{load}, R_C, R_L R_D, R_{DS\,ON}]$.

Вихідними ж значеннями слугують середні та амплітудні значення напруги на навантаженні та струму через котушку індуктивності: $\overline{Y} = [\mathrm{V}_{out\ mean}, V_{out\ pulse}, I_{L\ mean}, I_{L\ pulse}]$, де $\mathrm{V}_{out\ mean}$ це середня напруга на навантаженні, $V_{out\ pulse}$ це різниця між максимальним і мінімальним значенням напруги на наватаженні за період у вольтах, $I_{L\ mean}$ це середнє значення струму через індуктивність, а $I_{L\ pulse}$— різниця між максимальним і мінімальним значенням струму через індуктивність за період в амперах.

Важливо зазначити, що оскільки в понижуючому перетворювачі формула пульсацій струму через індуктивність має вигляд $\Delta I_L = \frac{(V_{in}-V_{out})\times D\times T}{L} = \frac{V_{in}\times(1-D)\times D\times T}{L}$, де T це період комутації, а формула пульсацій напруги навантаження має вигляд $\Delta V_{out} = \frac{T\times\Delta I_L}{8C} = \frac{V_{in}\times(1-D)\times D\times T^2}{8LC}$, то можна бачити, що обидві формули мають множник $(1-D)\times D$, який приймає максимальне значення при $D = 0{,}5$, отже при цьому значенні пульсації струму і напруги максимальні. Іншими словами, для формування таблички відповідності та діагностики пристрою доцільно використовувати $D = 0{,}5$, бо інакше стає складніше визначити, як саме на амплітуду пульсацій могла би вплинути некоректно працююча схема генерації ШІМ сигналу (наприклад, зниження D з 0,7 до 0,6 мало такий самий вплив на амплітуди пульсацій, як і збільшення D з 0,3 до 0,4).

В даному прикладі було обрано K = 3, що означає, що для кожного параметра буде перевірено 2×3=6 різних можливих змін відповідного параметра. Таким чином, промодельовані будуть такі відносні зміни: «+», «++», «+++», «-», «--» та «---». Процес побудови таблиці відповідності виглядає наступним чином: створюється базова модель зі значеннями, вказаними в таблиці 2. Далі для кожного з вхідних параметрів (V_{in}, D, L і т.д.) по черзі створюється нова модель зі значенням відповідного параметру помноженим на відповідне до кожного з 6 коефіцієнтів числове значення, зазначених в таблиці 3. Іншими словами, $x_{2i} = x_{1i} \times \tau_{iq}$, де x_{2i} це i-й компонент вектора $\overline{X}_2$, x_{1i} це i-й компонент вектора $\overline{X}_1$, а τ_{iq} це значення з таблиці 3 для i-го компоненту вектора $\overline{X}_2$ q-го коефіцієнту, де $q \in \{1,2,\ldots,2K\}$. Вихідні значення кожної такої моделі порівнюються з вихідними значеннями базової моделі. У цьому прикладі використовується загальне порогове значення θ = 0.06, що означає, що зміна вихідного значення на менш, ніж 6 %, буде проігнорована і відповідний r_i прийме значення «0». Вибір порогового значення θ = 0,06 для формування таблиці відповідності обумовлений необхідністю забезпечення високої дискримінативної здатності діагностичної моделі. На відміну від етапу детектування відмов на реальному обладнанні, де високий рівень шумів вимагає значних значень θ, етап математичного моделювання дозволяє зафіксувати первинні фізичні залежності. Значення 6 % відповідає нижній межі розбіжностей параметрів компонентів, описаній у фаховій літературі [32], що дозволяє ідентифікувати навіть слабкі кореляції між паразитними параметрами та вихідними характеристиками сигналів, уникаючи надмірної фільтрації корисних зв'язків у векторі $\overline{R}$. Водночас, правильний вибір θ для етапу формування таблички відповідності залишається відкритим питанням і потребує подальшого дослідження, оскільки гіпотетично його зміна може позитивно вплинути на результативність методології.

Таблиця 2 – Значення параметрів моделі для побудови таблиці відповідності

Параметр	Значення для симуляції
Час наростання струму затвора транзистора, t_{Gr}	0.1007 нс
Час спаду струму затвора транзистора, t_{Gf}	82.65 нс
Опір каналу транзистора, R_{DSon}	3.316 пОм
Опір діода R_D	1 мкОм
Струм насичення діода I_S	2.423e-15 А
Опір конденсатора, R_C	0.0878 Ом
Індуктивність конденсатора, L_C	0.322 нГн

Джерело: розроблено авторами.

У табл. 3, яка містить коефіцієнти для кожного зі ступенів зміни відповідного параметра, значення «0» як відносна зміна «---» слугують для симуляції граничних умов, коли компоненти на платі закорочені, але у деяких випадках через програмні проблеми PySpice з використанням Ngspice значення «0» не оброблялися коректно, тому були встановлені малі значення, а саме «0,01», «10^{-12}» та «10^{-24}». Аналогічно, для симуляції короткого замикання були використані великі значення опорів «10^{18}» для значень, що відповідають відносній зміні «+++».

Задля забезпечення continuous conduction режиму роботи моделі, моделювання триває 5000 періодів, після чого аналізується лише останній період.

Таблиця 3 – Множники, що відповідають відносним змінам кожного з параметрів перетворювача

---	--	-	+	++	+++
Вхідна напруга, V_{in}					
1/2	1/1.5	1/1.1	1.1	1.5	2
коефіцієнт заповнення сигналу ШІМ, D					
10^{-6}	1/1.7	1/1.2	1.2	1.7	2
Індуктивність котушки, L					
0	1/10	1/1.2	1.2	10	100
Ємність конденсатора, C					
1/10000	1/100	1/1.5	1.5	100	10000
Опір навантаження, R_{load}					
0	1/5	1/1.25	1.25	5	10^{18}
Еквівалентний послідовний опір конденсатора, R_C					
0	1/100	1/5	5	100	10^{18}
Еквівалентний послідовний опір котушки індуктивності, R_L					
10^{-12}	1/100	1/5	5	100	10^{18}
Опір діода, R_D					
10^{-24}	1/1000	1/10	10	1000	10^{18}
Опір стік-витік відкритого транзистора, $R_{DS\,ON}$					
0	1/1000	1/10	10	1000	10^{18}

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 3 зображено теплові карти, які відображають вплив відносних змін вхідних значень на вихідні значення. Білим кольором позначено відносну зміну «0» (тобто зміна нижче за порогове значення $\theta = 0.06$, як пояснено вище), червоним позначено відносну зміну «-», а синім – «+». Для прикладу розглянемо вплив значення індуктивності L на пульсації струму через котушку $I_{L\,pulse}$: можна бачити з теплової карти з підписом «Impact on Ipulse», що для відносних змін «---», «--», які відповідають коефіцієнтам 0 та $\frac{1}{10}$, відповідно, значення $I_{L\,pulse}$ збільшується достатньо щоб присвоїти відповідному компоненту вектора $\overline{R}$ значення «+». Аналогічно для відносних змін «++» та «+++», які відповідають коефіціїнтам 10 та 100 відповідно, значення $I_{L\,pulse}$ зменшується достатньо, щоб присвоїти відповідному компоненту вектора $\overline{R}$ значення «-».

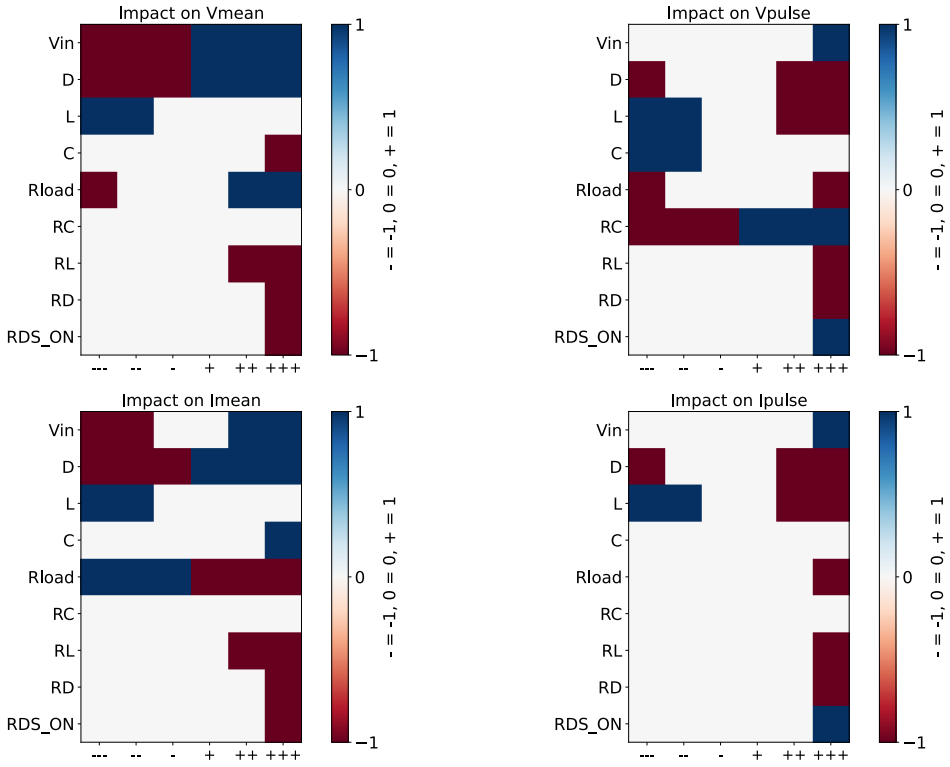


Рис. 3. Теплові карти впливів змін вхідних значень на вихідні
Джерело: розроблено авторами.

У результаті отримано табличку відповідності, що зображена в табл. 4.

Таблиця 4 – Таблиця відповідності

Вектор $\overline{R}$, відповідний до $[V_{out\ mean}, V_{out\ pulse}, I_{L\ mean}, I_{L\ pulse}]$	**Вектор $\overline{E}$, відповідний до $[V_{in}, D, L, C, R_{load}, R_C, R_L, R_D, R_{DS\ ON}]$**
[0,0,0,0]	[{0},{0},{+,-},{++,+,-},{0},{0},{+,-,--,---},{++,+,-,--,---},{++,+,-,--,---}]
[-,-,-,-]	[{0},{---},{0},{0},{0},{0},{+++},{+++},{0}]
[0,+,0,0]	[{0},{0},{0},{--,---},{0},{+++,++,+},{0},{0},{0}]
[+,+,+,+]	[{+++},{0},{--,---},{0},{0},{0},{0},{0},{0}]
[0,-,0,-]	[{0},{0},{++,+++},{0},{0},{0},{0},{0},{0}]
[0,0,-,0]	[{0},{0},{0},{0},{+},{0},{0},{0},{0}]
[0,-,0,0]	[{0},{0},{0},{0},{0},{-,--,---},{0},{0},{0}]
[-,+,-,+]	[{0},{0},{0},{0},{0},{0},{0},{0},{+++}]]
[+,-,+,-]	[{0},{+++,++},{0},{0},{0},{0},{0},{0},{0}]
[-,0,-,0]	[{--,---},{-,--},{0},{0},{0},{0},{++},{0},{0}]
[+,0,+,0]	[{++},{+},{0},{0},{0},{0},{0},{0},{0}]
[0,0,+,0]	[{0},{0},{0},{0},{-, --},{0},{0},{0},{0}]
[-,-,+,+]	[[{0},{0},{0},{0},{---},{0},{0},{0},{0}]
[+,0,0,0]	[{+} ,{0}, {0}, {0}, {0}, {0}, {0}, {0}, {0}]
[-,0,0,0]	[{-} ,{0}, {0}, {0}, {0}, {0}, {0}, {0}, {0}]
[-,0,+,0]	[{0} ,{0}, {0}, {+++}, {0}, {0}, {0}, {0}, {0}]
[+,-,-,-]	[{0} ,{0}, {0}, {0}, {+++}, {0}, {0}, {0}, {0}]
[+,0,-,0]	[{0} ,{0}, {0}, {0}, {++}, {0}, {0}, {0}, {0}]
[-,-,+,0]	[{0} ,{0}, {0}, {0}, {---}, {0}, {0}, {0}, {0}]

Джерело: розроблено авторами.

Тестування. Задля перевірки правильності функціонування даної імплементації методології було поставлено описані нижче тести. Кожен з тестів виконувався шляхом цілеспрямованого контрольованого встановлення неправильних значень на схемі задля симуляції певних проблем з апаратним забезпеченням або схемою керування транзистором. Задля того, аби знизити рівень випадковості тестів, кожен з них виконувався багато разів протягом тривалого часу (одна година і більше), потім зібрані значення аналізувалися і робилися висновки стосовно правильності спрацювання алгоритму. Аналіз даних полягає в вирахуванні найбільшого та найменшого відхилення кожного з чотирьох показників (середня напруга, пульсації напруги, середній струм, пульсації струму) відносно результатів, отриманих з оптимізованого цифрового двійника. Далі ці найбільші та найменші відхилення порівнюються з пороговими значеннями, зазначеними в таблиці 1 і робиться висновок про напрямок відносної зміни: “-”, “0” або “+”, з усіх чотирьох показників формується вектор $\overline{R}$. Отриманий таким чином вектор $\overline{R}$ шукають у табличці відповідності і перевіряється, чи містить відповідний вектор $\overline{E}$ правильну причину такої поведінки схеми. Значення відсотків кількості виявлення конкретних відхилень в таблицях округлено до десятих задля спрощення сприйняття.

Під розширеним пошуком в табличці відповідності мається на увазі описаний в статті [30] підхід, коли будь-який компонент вектора $\overline{R}$ зі значенням «0» може сприйматися як «+» або «-».

Тест відхилення коефіцієнту заповнення ШІМ. Можливою причиною неправильної поведінки перетворювача напруги є апаратні або програмні помилки в схемі керування транзистора. Однією з таких помилок може слугувати неправильно встановлений коефіцієнт заповнення сигналу ШІМ. Проаналізовано наступні відхилення коефіцієнту заповнення від очікуваного:

1. 40 замість 50:

Даний тест був виконаний над набором даних, що складається з 1991 вимірювання. Наступна табличка містить статистичні дані цього тесту:

Таблиця 5 – Результати тесту відхилення коефіцієнту заповнення 40 замість 50

Показник	Максимальне відхилення, %	Мінімальне відхилення, %	Відсоток значень, менших за θ по модулю, %	Напрямок відносної зміни (-/+/0)
Середня напруга	-16,12	-16,35	0	-
Пульсації напруги	29,19	-37,49	100	0
Середній струм	-16,59	-26,04	0	-
Пульсації струму	49,54	-41,64	100	0

Джерело: розроблено авторами

Отже, усі з 1991 вимірювання мають вектор $\overline{R}$ зі значенням «-0-0», що по табличці відповідності вказує на вектор $\overline{E}$, що містить відносну зміну “--” параметра. Отже, в даному тесті алгоритм показав 100% коректність роботи при зміні коефіцієнту заповнення в 40/50*100 = 20%.

2. 45 замість 50:

Відповідна таблиця статистичних даних:

Таблиця 6 – Результати тесту відхилення коефіцієнта заповнення 45 замість 50

Показник	Максимальне відхилення, %	Мінімальне відхилення, %	Відсоток значень, менших за θ по модулю, %	Напрямок відносної зміни (-/+/0)
Середня напруга	-6.57	-6.81	0	-
Пульсації напруги	33.36	-37.49	100	0
Середній струм	-7.67	-16.38	85.1	-/0
Пульсації струму	27.66	-41.64	100	0

Джерело: розроблено авторами.

З результатів цього тесту на 1124 вимірюваннях видно, що у 85.1% випадків вектор R має значення «-0-0» (що і очікується), але в інших 14,9 % випадках $\overline{R}$ = «-000», відповідний до якого вектор $\overline{E}$ не містить коректної причини відхилення в даному випадку. Отже, при зміні коефіцієнту заповнення в 45/50*100 = 10 % коректність роботи алгоритму склала 100 % у плані детектування неправильності роботи, але 85,1 % в плані правильного визначення причини такої роботи. Як можна бачити з таблиці, дана неточність викликана тільки показником струму, що пояснюється неточністю роботи самого апаратного забезпечення, що тестується, через проблеми в схемі вимірювання струму. При використанні підходу з розширенням можливих причин відмови, що описана в [30], причина даної некоректної поведінки може бути встановлена правильно, хоча це й збільшить кількість потенційних причин.

3. 1 замість 50:

Таблиця 7 – Результати тесту відхилення коефіцієнт заповнення 1 замість 50

Показник	Максимальне відхилення, %	Мінімальне відхилення, %		Відсоток значень, менших за θ по модулю, %	Напрямок відносної зміни (-/+/0)
Середня напруга	-96.87	-97.23		0	-
Пульсації напруги	38.57	-62.53		91.9	-/0
Середній струм	-97.40	-98.29		0	-
Пульсації струму	16.06	-47.28		100	0

Джерело: розроблено авторами.

Для даного тесту було зібрано 8600 вимірювань. З результатів видно, що в усіх 100% вимірюваннях алгоритмом було помічено некоректну поведінку, але в 8.1% випадків вектор $\overline{R}$ мав значення «---0» (на відміну від інших 91.9% випадків з «-0-0»), який не має відповідного рядку в табличці відповідності, а отже для правильного визначення причини відмови потрібно було б використати підхід з розширеним пошуком в табличці, як згадувалося вище. Така поведінка пов’язана з досить низькими значеннями пульсацій напруги, особливо при низьких значеннях середньої напруги, як, власне, і відбувалося в тесті, оскільки коефіцієнт заповнення було виставлено на рівні 1/100. При таких низьких пульсаціях зовнішні шуми мають більш вагомий вплив на розрахунки.

4. 60 замість 50

Таблиця 8 – Результати тесту відхилення коефіцієнту заповнення 60 замість 50

Показник	Максимальне відхилення, %	Мінімальне відхилення, %	Відсоток значень, менших за θ по модулю, %	Напрямок відносної зміни (-/+/0)
Середня напруга	25.61	24.18	0	+
Пульсації напруги	45.78	-41.69	100	0
Середній струм	23.12	12.96	0.3	+/0
Пульсації струму	31.30	-45.29	100	0

Джерело: розроблено авторами.

Даний тест був виконаний на 1454 вимірюванні. Він показує поведінку алгоритму при збільшенні коефіцієнту заповнення. З нього видно, що, аналогічно до попередніх тестів, у всіх 100 % випадків було задетектовано відхилення в поведінці пристрою. У 99,7 % причина була визначена правильно, а в інших 0,3 % вектор $\overline{R}$ мав значення «+000», що, відповідно до таблички відповідності без використання розширеного пошуку, помилково вказало би не на невелике збільшення коефіцієнту заповнення ШІМ, а на невелике збільшення вхідної напруги.

Тест відхилення вхідної напруги. Іншою можливою причиною несправності може слугувати неправильна напруга на вході пристрою, тобто проблеми з живленням. Проаналізовано наступні відхилення вхідної напруги від очікуваної:

1. 10 В замість 12 В:

Таблиця 9 – Результати тесту відхилення вхідної напруги 10 В замість 12 В

Показник	Максимальне відхилення, %	Мінімальне відхилення, %	Відсоток значень, менших за θ по модулю, %	Напрямок відносної зміни (-/+/0)
Середня напруга	-13.17	-14.43	0	-
Пульсації напруги	25.02	-37.49	100	0
Середній струм	-10.34	-26.36	0.4	-/0
Пульсації струму	13.07	-56.23	99.9	0/-

Джерело: розроблено авторами.

Даний тест виконаний на 3119 вимірюваннях. У 99.5% випадків вектор $\overline{R}$ має значення «-0-0», що, через табличку відповідності, вказує на правильну причину некоректності поведінки. У 0,4 % випадків вектор приймає значення «-000», що також вказує на зниження вхідної напруги, що є правильною причиною. В інших 0,1 % випадків (2 вимірювання з 3119) вектор приймає значення «-0--», яке не міститься в табличці відповідності безпосередньо. В усіх 100 % випадках факт наявності несправності був помічений.

2. 6 В замість 12 В:

Таблиця 10 – Результати тесту відхилення вхідної напруги 6 В замість 12 В

Показник	Максимальне відхилення, %	Мінімальне відхилення, %	Відсоток значень, менших за θ по модулю, %	Напрямок відносної зміни (-/+/0)
Середня напруга	-48.77	-49.17	0	-
Пульсації напруги	16.57	-41.72	100	0
Середній струм	-44.99	-59.98	0.4	-
Пульсації струму	2.12	-70.82	53.2	0/-

Джерело: розроблено авторами.

За результатами цього тесту на 1013 вимірювання в порівнянні з попереднім видно, що при зниженні напруги на вході, алгоритм починає гірше детектувати причину відмови. Так, у цьому тесті у 53.2% випадків вектор $\overline{R}$ мав значення «-0-0», що правильно вказує на зниження вхідної напруги. Проте в решті 46,8 % випадків вектор приймав значення «-0--», що не має прямого відображення в табличці відповідності. Такий результат пов’язаний з природою поведінки пульсацій струму в пристрої. Оскільки при зниженні вхідної напруги знижуються і значення струму через індуктивність, то шуми і паразитні пульсації через проблеми в обладнанні стають більш помітними і суттєво впливають на вимірювання пульсацій струму.

3. 14 В замість 12 В:

Таблиця 11 – Результати тесту відхилення вхідної напруги 14 В замість 12 В

Показник	Максимальне відхилення, %	Мінімальне відхилення, %	Відсоток значень, менших за θ по модулю, %	Напрямок відносної зміни (-/+/0)
Середня напруга	22,23	21,01	0	+
Пульсації напруги	75,03	-33,32	99,9	0/+
Середній струм	19,01	9,52	46,4	+/0
Пульсації струму	38,60	-30,70	100	0

Джерело: розроблено авторами.

В даному тесті на 1632 вимірювання у 53.6% випадків вектор $\overline{R}$ мав значення «+0+0», а в 46,3 % «+000», обоє з яких правильно визначають причину відмови – вхідна напруга вища за очікувану. Лише в одному випадку з «1632» (менш, ніж 0,1 %) вектор $\overline{R}$ мав значення «++00», що не міститься в табличці відповідності.

4. 18 В замість 12 В:

Таблиця 12 – Результати тесту відхилення вхідної напруги 18 В замість 12 В

Показник	Максимальне відхилення, %	Мінімальне відхилення, %	Відсоток значень, менших за θ по модулю, %	Напрямок відносної зміни (-/+/0)
Середня напруга	57.15	56.80	0	+
Пульсації напруги	79.11	-37.52	99.3	0/+
Середній струм	54.51	43.43	0	+
Пульсації струму	64.13	-12.47	97.7	0/+

Джерело: розроблено авторами.

Цей тест був виконаний на 1828 вимірюваннях. У 97% випадків вектор $\overline{R}$ приймав значення «+0+0», що повністю коректно визначає причину відхилення у поведінці пристрою. У 2,3 % випадків $\overline{R}$ мав значення «+0++», а в 0,7 % – «+++0», обидва з яких не мають свого рядка в таблиці відповідності, але перший із них показав би коректну причину при умові використання розширеного пошуку.

Тест відхилення опору навантаження. Ще однією можливою причиною некоректної поведінки може бути зміна опору навантаження. Для цього випадку було проведено наступні тести:

1. 2 Ом замість 4 Ом:

Таблиця 13 – Результати тесту відхилення опору навантаження 2 Ом замість 4 Ом

Показник	Максимальне відхилення, %	Мінімальне відхилення, %	Відсоток значень, менших за θ по модулю, %	Напрямок відносної зміни (-/+/0)
Середня напруга	1.83	0.66	100	0
Пульсації напруги	37.38	-33.39	100	0
Середній струм	102.27	91.23	0	+
Пульсації струму	34.95	-38.00	100	0

Джерело: розроблено авторами.

У цьому тесті на 2256 вимірювання в усіх 100% випадків вектор $\overline{R}$ мав значення «00+0», що повністю правильно визначає причину некоректної поведінки.

2. 19 Ом замість 4 Ом:

Таблиця 14 – Результати тесту відхилення вхідної напруги 19 Ом замість 4 Ом

Показник	Максимальне відхилення, %	Мінімальне відхилення, %	Відсоток значень, менших за θ по модулю, %	Напрямок відносної зміни (-/+/0)
Середня напруга	7.49	6.19	0	+
Пульсації напруги	12.40	-41.72	100	0
Середній струм	-77.63	-86.83	0	-
Пульсації струму	20.36	-41.65	100	0

Джерело: розроблено авторами.

З результатів даного тесту на 694 вимірювання видно, що в усіх 100% вектор $\overline{R}$ приймав значення «+0-0», що свідчить про правильну роботу алгоритма та коректне визначення причини відмови.

2. 5 Ом замість 4 Ом:

Таблиця 15 – Результати тесту відхилення вхідної напруги 5 Ом замість 4 Ом

Показник	Максимальне відхилення, %	Мінімальне відхилення, %	Відсоток значень, менших за θ по модулю, %	Напрямок відносної зміни (-/+/0)
Середня напруга	4.4	4.26	100	0
Пульсації напруги	45.71	-41.72	100	0
Середній струм	-19.45	-29.89	0	-
Пульсації струму	24.00	-38.00	100	0

Джерело: розроблено авторами.

У цьому тесті було використано 1066 вимірювань. В усіх 100 % вектор $\overline{R}$ мав значення «00-0», що, згідно таблички відповідності, правильно визначає причину відмови.

Тест без відхилень. Окрім тестів, що перевіряють коректність детектування якоїсь відмови або проблеми, було проведено тест з коректною поведінкою (без відхилень) щоб переконатися, що алгоритм не має помилкових спрацювань. Тест виконувався на 1040 вимірюваннях. Результати тесту наведені в табл. 16.

Таблиця 16 – Результати тесту без відхилень

Показник	Максимальне відхилення, %	Мінімальне відхилення, %	Відсоток значень, менших за θ по модулю, %	Напрямок відносної зміни (-/+/0)
Середня напруга	3.81	3.21	100	0
Пульсації напруги	28.99	-37.59	100	0
Середній струм	3.19	-6.72	100	0
Пульсації струму	27.65	-41.65	100	0

Джерело: розроблено авторами.

Як видно з результатів, в усіх 100 % вимірюваннях алгоритм спрацював правильно і не було жодного хибного спрацювання.

У процесі тестування було помічено, що для збільшення точності методології бажано використовувати більшу кількість відносних змін, що, в свою чергу, має знизити кількість «пробілів» – векторів $\overline{R}$, для яких нема прямого відповідного вектора $\overline{E}$ в табличці.

Аналіз факторів, що впливають на точність ідентифікації

Незважаючи на високу ефективність виявлення факту відхилень (100 % у проведених тестах), точність ідентифікації конкретних причин несправностей у межах 85–100 % обумовлена не обмеженнями самої методології, а метрологічними характеристиками використаного експериментального стенда. Оскільки запропонований підхід є інваріантним до типу апаратного забезпечення та базується на універсальних математичних моделях, достовірність діагностичних рішень безпосередньо корелює з якістю вхідних даних.

Проведений аналіз виявив наступні фактори, що вносять додаткову невизначеність:

Артефакти вимірювань. Сигнали струму в експериментальному макеті мають помітні спотворення («спайки») у моменти комутації, природа яких пов’язана з особливостями побудови конкретної схеми вимірювання. Ці апаратні шуми ускладнюють розрахунок реальних пульсацій, що може призводити до формування некоректних діагностичних векторів у граничних випадках.

Динамічна нестабільність параметрів. В існуючій реалізації перетворювача спостерігаються флуктуації опору навантаження, оскільки пристрій задизайнений із пріоритетом регулювання вихідного струму, а не підтримки стабільного опору. Це призводить до розбіжностей між статичними параметрами моделі та реальними значеннями у момент вимірювання.

Вимоги до точності даних. Застосування фільтра ковзного середнього дозволило компенсувати частину завад і знизити абсолютну різницю пульсацій у 2,83 раза [31]. Однак для повної нівеляції зсуву та забезпечення ідеальної точності ідентифікації доцільним є використання більш точного вимірювального обладнання з вищою роздільною здатністю та меншим рівнем власних шумів, що є стандартною вимогою для промислових систем діагностики.

Чутливість до шумів при низьких амплітудах. У режимах з низьким коефіцієнтом заповнення або зниженою вхідною напругою, корисний сигнал пульсацій стає сумірним із рівнем зовнішніх завад. У таких умовах вплив неідеільності вимірювальної схеми стає критичним, що підтверджується результатами тестів, де точність ідентифікації причини дещо знижувалася при значних відхиленнях від номінального режиму.

Таким чином, підвищення достовірності діагностики вбачається у використанні професійних інструментальних засобів збору даних, що дозволить повністю реалізувати аналітичний потенціал розробленої методології.

Висновки. Практична імплементація методології діагностики апаратного забезпечення на основі цифрового двійника для понижуючого перетворювача постійного струму продемонструвала високу ефективність підходу. Застосування PySpice з Ngspice для створення математичної моделі з урахуванням семи паразитних параметрів (опір котушки, ESR конденсатора, паразитна індуктивність конденсатора, опір діода, опір відкритого транзистора) на основі 6705 експериментальних вимірювань дозволило створити точний цифровий двійник реального обладнання. Тестування на серії наборів сигналів показала 100 % виявлення факту відмови в усіх сценаріях, з коректним визначенням причини у 85.1-100 % випадків залежно від ступеня відхилення параметрів.

Розроблений підхід до формування таблиці відповідності через моделювання шести ступенів відносних змін («+», «++», «+++», «-», «--», «---») для кожного вхідного параметра та використання порогового значення $\theta = 0.06$ забезпечує надійну діагностику навіть при роботі з неточним обладнанням. Тестування на реальному обладнанні з високим рівнем шумів (співвідношення мінімальних і максимальних значень пульсацій понад 100%) підтвердило стійкість методології до неідеальних умов експлуатації.

Дана стаття логічно продовжує роботу, в якій було описано методологію діагностики, а також користується результатами роботи щодо ідентифікації паразитних параметрів перетворювача постійного струму за допомогою генетичного алгоритму. Водночас правильний вибір θ для етапу формування таблички відповідності залишається відкритим питанням і потребує подальшого дослідження, оскільки гіпотетично його зміна може позитивно вплинути на результативність методології.

Результати дослідження заповнюють прогалину у практичному застосуванні цифрових двійників для діагностики силової електроніки в режимі реального часу, забезпечуючи баланс між точністю моделювання та обчислювальною ефективністю. Розроблена методологія здатна виявляти як жорсткі, так і м'які відмови через систематичний аналіз чотирьох ключових показників (середня напруга, пульсації напруги, середній струм, пульсації струму). Застосування методу математичного моделювання замість експериментального підходу дозволяє швидку адаптацію до інших топологій перетворювачів та конфігурацій без ризику пошкодження фізичного обладнання.

Впровадження описаної методології в систему дистанційних лабораторій, що були розроблені в рамках проєкту LabDiscoveryEngine для вивчення перетворювачів постійного струму, має потенціал знизити кількість та загальний час простоїв електронного обладнання через забезпечення можливості раннього виявлення деградації компонентів та перехід від реактивного до проактивного технічного обслуговування.

Подальший розвиток і масштабування подібних систем може призвести до значного зниження експлуатаційних витрат у критичних системах, що використовують пристрої силової електроніки.

Список використаних джерел

1. Wang, L., Zhu, F., Jiang, F., & Yang, Y. (2025). Power converter fault detection using MLCA–SpikingShuffleNet. *World Electric Vehicle Journal*, *16*(1), 36. https://doi.org/10.3390/wevj16010036

2. Saravanan, B., D, P., & Vengateson, A. (2025). *Benchmarking traditional machine learning and deep learning models for fault detection in power transformers*. arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.06295.

3. Ferreira Costa, L., & Liserre, M. (2018). Failure analysis of the dc-dc converter: A comprehensive survey of faults and solutions for improving reliability. *IEEE Power Electronics Magazine*, *5*(4), 42–51. https://doi.org/10.1109/MPEL.2018.2874345.

4. Siemens. (2022). *The true cost of downtime 2022*. [White Paper/Report].

5. Yang, S., Xiang, D., Bryant, A. T., Mawby, P., Ran, L., & Tavner, P. J. (2010). Condition monitoring for device reliability in power electronic converters: A review. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *25*(11), 2734–2752. https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2049377.

6. Jain, P., Poon, J., Singh, J. P., Spanos, C., Sanders, S., & Panda, S. (2019). A digital twin approach for fault diagnosis in distributed photovoltaic system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *35*(1), 1–1. https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2911594.

7. Lei, Z., Zhou, H., Dai, X., Hu, W., & Liu, G. P. (2023). Digital twin based monitoring and control for DC-DC converters. *Nature Communications*, *14*(1). https://doi.org/10.1038/s41467-023-41248-z.

8. Jia, Z., Liu, Z., Vong, C. M., Wang, S., & Cai, Y. (2023). DC-DC Buck circuit fault diagnosis with insufficient state data based on deep model and transfer strategy. *Expert Systems with Applications*, *213*(Part A), 118918. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118918.

9. Ajra, Y., Hoblos, G., Al Sheikh, H., & Moubayed, N. (2024). A literature review of fault detection and diagnostic methods in three-phase voltage-source inverters. *Machines*, *12*(9), 631. https://doi.org/10.3390/machines12090631.

10. Aviña-Corral, V., Rangel-Magdaleno, J. J., Barron-Zambrano, J. H., & Rosales-Nuñez, S. (2024). Review of fault detection techniques in power converters: Fault analysis and diagnostic methodologies. *Measurement*, *234*, 114864. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114864.

11. Skliros, C., Esperon Miguez, M., Ali, F., & Jennions, I. K. (2018). A review of model based and data driven methods targeting hardware systems diagnostics. *Diagnostyka*, *20*(1), 3–21. https://doi.org/10.29354/diag/99603.

12. Ren, J., Wen, J., Zhao, Z., Yan, R., Chen, X., & Nandi, A. (2024). Uncertainty-aware deep learning: A promising tool for trustworthy fault diagnosis. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, *11*(6), 1317–1330. https://doi.org/10.1109/JAS.2024.124290.

13. Xiao, B., Zhong, J., Bao, X., et al. (2024). Digital twin-driven prognostics and health management for industrial assets. *Scientific Reports*, *14*, 13443. https://doi.org/10.1038/s41598-024-63990-0.

14. Kumar, G. K., & Elangovan, D. (2020). Review on fault-diagnosis and fault-tolerance for DC–DC converters. *IET Power Electronics*, *13*(1), 1–13. https://doi.org/10.1049/iet-pel.2019.0672.

15. Li, J., Pan, K., Su, Q., & Zhao, X. (2019). Sensor fault detection and fault-tolerant control for Buck converter via affine switched systems. *IEEE Access*, *7*, 1–1. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909124.

16. Butnicu, D. A. (2023). Derating-sensitive tantalum polymer capacitor's failure rate within a DC-DC eGaN-FET-based PoL converter workbench study. *Micromachines*, *14*(1), 221. https://doi.org/10.3390/mi14010221.

17. Miao, J., Liu, Y., Yin, Q., Ju, B., Zhang, G., & Wang, H. (2024). A novel soft fault detection and diagnosis method for a DC/DC Buck converter based on contrastive learning. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *39*(1), 1501–1513. https://doi.org/10.1109/TPEL.2023.3320878.

18.Barrios, P. H., Rodríguez, F., Sánchez, P., Santos, C., Sangwongwanich, A., Novak, M., & Blaabjerg, F. (2025). Digital twin approach for fault diagnosis in photovoltaic plant DC–DC converters. *Sensors*, *25*(14), 4323. https://doi.org/10.3390/s25144323.

19.Chen, Y., Zhang, D., Yan, R., & Xie, M. (2025). Applications of domain generalization to machine fault diagnosis: A survey. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. https://doi.org/10.1109/JAS.2025.125120.

20.Pill, I., & de Kleer, J. (2024). Challenges for model-based diagnosis. *35th International Conference on Principles of Diagnosis and Resilient Systems (DX 2024)*, *125*, 6:1–6:20. https://doi.org/10.4230/OASIcs.DX.2024.6.

21.Bofill, J., Abisado, M., Villaverde, J., & Sampedro, G. (2023). Exploring digital twin-based fault monitoring: Challenges and opportunities. *Sensors*, *23*(16), 7087. https://doi.org/10.3390/s23167087.

22.Chen, H., Zhang, Z., Karamanakos, P., & Rodriguez, J. (2023). Digital twin techniques for power electronics-based energy conversion systems: A survey of concepts, application scenarios, future challenges, and trends. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, *17*(2), 20–36. https://doi.org/10.1109/MIE.2022.3216719

23.Peng, Y., Zhao, S., & Wang, H. (2021). A digital twin based estimation method for health indicators of DC–DC converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *36*(2), 2105–2118. https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3009600.

24.Milton, M., De La O, C., Ginn, H. L., & Benigni, A. (2020). Controller-embeddable probabilistic real-time digital twins for power electronic converter diagnostics. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *35*(9), 9850–9864. https://doi.org/10.1109/tpel.2020.2971775.

25.Song, Z., Hackl, C. M., Anand, A., et al. (2023). Digital twins for the future power system: An overview and a future perspective. *Sustainability*, *15*(6), 5259. https://doi.org/10.3390/su15065259.

26.Song, E. Y., Burns, M., Pandey, A., & Roth, T. (2019). IEEE 1451 smart sensor digital twin federation for IoT/CPS research. *2019 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, 1–6. https://doi.org/10.1109/SAS.2019.8706111.

27.Ferko, E., Bucaioni, A., Pelliccione, P., & Behnam, M. (2023). Standardisation in digital twin architectures in manufacturing. *2023 IEEE 20th International Conference on Software Architecture (ICSA)*, 70–81. https://doi.org/10.1109/ICSA56044.2023.00015.

28.Hedayati Kia, S., Dunai, L., Antonino-Daviu, J. A., & Razik, H. (2025). Real-time digital twins for intelligent fault diagnosis and condition-based monitoring of electrical machines. *Energies*, *18*(17), 4637. https://doi.org/10.3390/en18174637.

29.Fu, C., Gao, C., & Zhang, W. (2023). A digital-twin framework for predicting the remaining useful life of piezoelectric vibration sensors with sensitivity degradation modeling. *Sensors*, *23*(19), 8173. https://doi.org/10.3390/s23198173.

30.Байда, В., & Велігорський, О. (2025). Методологія діагностики апаратного забезпечення з використанням інформаційної технології цифрового двійника. *Технічні науки та технології*, (2 (40), 234–253. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-234-253.

31.Байда, В., & Велігорський, О. (2026). Ідентифікація паразитних параметрів моделі перетворювача постійного струму генетичним алгоритмом. Технічні науки та технології, (4 (42), 165–186. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-165-186.

32.Riba, J.-R., Moreno-Eguilaz, M., Bogarra, S., & Garcia, A. (2018). Parameter identification of DC-DC converters under steady-state and transient conditions based on white-box models. *Electronics*, *7*(12), 393. https://doi.org/10.3390/electronics7120393.

References

1. Wang, L., Zhu, F., Jiang, F., & Yang, Y. (2025). Power converter fault detection using MLCA–SpikingShuffleNet. *World Electric Vehicle Journal*, *16*(1), 36. https://doi.org/10.3390/wevj16010036.

2. Saravanan, B., D, P., & Vengateson, A. (2025). *Benchmarking traditional machine learning and deep learning models for fault detection in power transformers*. arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.06295.

3. Ferreira Costa, L., & Liserre, M. (2018). Failure analysis of the dc-dc converter: A comprehensive survey of faults and solutions for improving reliability. *IEEE Power Electronics Magazine*, *5*(4), 42–51. https://doi.org/10.1109/MPEL.2018.2874345.

4. Siemens. (2022). *The true cost of downtime 2022*. [White Paper/Report].

5. Yang, S., Xiang, D., Bryant, A. T., Mawby, P., Ran, L., & Tavner, P. J. (2010). Condition monitoring for device reliability in power electronic converters: A review. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *25*(11), 2734–2752. https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2049377.

6. Jain, P., Poon, J., Singh, J. P., Spanos, C., Sanders, S., & Panda, S. (2019). A digital twin approach for fault diagnosis in distributed photovoltaic system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *35*(1), 1–1. https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2911594.

7. Lei, Z., Zhou, H., Dai, X., Hu, W., & Liu, G. P. (2023). Digital twin based monitoring and control for DC-DC converters. *Nature Communications*, *14*(1). https://doi.org/10.1038/s41467-023-41248-z.

8. Jia, Z., Liu, Z., Vong, C. M., Wang, S., & Cai, Y. (2023). DC-DC Buck circuit fault diagnosis with insufficient state data based on deep model and transfer strategy. *Expert Systems with Applications*, *213*(Part A), 118918. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118918.

9. Ajra, Y., Hoblos, G., Al Sheikh, H., & Moubayed, N. (2024). A literature review of fault detection and diagnostic methods in three-phase voltage-source inverters. *Machines*, *12*(9), 631. https://doi.org/10.3390/machines12090631.

10. Aviña-Corral, V., Rangel-Magdaleno, J. J., Barron-Zambrano, J. H., & Rosales-Nuñez, S. (2024). Review of fault detection techniques in power converters: Fault analysis and diagnostic methodologies. *Measurement*, *234*, 114864. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114864.

11. Skliros, C., Esperon Miguez, M., Ali, F., & Jennions, I. K. (2018). A review of model based and data driven methods targeting hardware systems diagnostics. *Diagnostyka*, *20*(1), 3–21. https://doi.org/10.29354/diag/99603.

12. Ren, J., Wen, J., Zhao, Z., Yan, R., Chen, X., & Nandi, A. (2024). Uncertainty-aware deep learning: A promising tool for trustworthy fault diagnosis. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, *11*(6), 1317–1330. https://doi.org/10.1109/JAS.2024.124290.

13. Xiao, B., Zhong, J., Bao, X., et al. (2024). Digital twin-driven prognostics and health management for industrial assets. *Scientific Reports*, *14*, 13443. https://doi.org/10.1038/s41598-024-63990-0.

14. Kumar, G. K., & Elangovan, D. (2020). Review on fault-diagnosis and fault-tolerance for DC–DC converters. *IET Power Electronics*, *13*(1), 1–13. https://doi.org/10.1049/iet-pel.2019.0672.

15. Li, J., Pan, K., Su, Q., & Zhao, X. (2019). Sensor fault detection and fault-tolerant control for Buck converter via affine switched systems. *IEEE Access*, *7*, 1–1. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909124.

16. Butnicu, D. A. (2023). Derating-sensitive tantalum polymer capacitor's failure rate within a DC-DC eGaN-FET-based PoL converter workbench study. *Micromachines*, *14*(1), 221. https://doi.org/10.3390/mi14010221.

17. Miao, J., Liu, Y., Yin, Q., Ju, B., Zhang, G., & Wang, H. (2024). A novel soft fault detection and diagnosis method for a DC/DC Buck converter based on contrastive learning. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *39*(1), 1501–1513. https://doi.org/10.1109/TPEL.2023.3320878.

18. Barrios, P. H., Rodríguez, F., Sánchez, P., Santos, C., Sangwongwanich, A., Novak, M., & Blaabjerg, F. (2025). Digital twin approach for fault diagnosis in photovoltaic plant DC–DC converters. *Sensors*, *25*(14), 4323. https://doi.org/10.3390/s25144323.

19. Chen, Y., Zhang, D., Yan, R., & Xie, M. (2025). Applications of domain generalization to machine fault diagnosis: A survey. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. https://doi.org/10.1109/JAS.2025.125120.

20. Pill, I., & de Kleer, J. (2024). Challenges for model-based diagnosis. *35th International Conference on Principles of Diagnosis and Resilient Systems (DX 2024)*, *125*, 6:1–6:20. https://doi.org/10.4230/OASIcs.DX.2024.6.

21. Bofill, J., Abisado, M., Villaverde, J., & Sampedro, G. (2023). Exploring digital twin-based fault monitoring: Challenges and opportunities. *Sensors*, *23*(16), 7087. https://doi.org/10.3390/s23167087.

22.Chen, H., Zhang, Z., Karamanakos, P., & Rodriguez, J. (2023). Digital twin techniques for power electronics-based energy conversion systems: A survey of concepts, application scenarios, future challenges, and trends. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, *17*(2), 20–36. https://doi.org/10.1109/MIE.2022.3216719.

23.Peng, Y., Zhao, S., & Wang, H. (2021). A digital twin based estimation method for health indicators of DC–DC converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *36*(2), 2105–2118. https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3009600.

24.Milton, M., De La O, C., Ginn, H. L., & Benigni, A. (2020). Controller-embeddable probabilistic real-time digital twins for power electronic converter diagnostics. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *35*(9), 9850–9864. https://doi.org/10.1109/tpel.2020.2971775.

25.Song, Z., Hackl, C. M., Anand, A., et al. (2023). Digital twins for the future power system: An overview and a future perspective. *Sustainability*, *15*(6), 5259. https://doi.org/10.3390/su15065259.

26.Song, E. Y., Burns, M., Pandey, A., & Roth, T. (2019). IEEE 1451 smart sensor digital twin federation for IoT/CPS research. *2019 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, 1–6. https://doi.org/10.1109/SAS.2019.8706111.

27.Ferko, E., Bucaioni, A., Pelliccione, P., & Behnam, M. (2023). Standardisation in digital twin architectures in manufacturing. *2023 IEEE 20th International Conference on Software Architecture (ICSA)*, 70–81. https://doi.org/10.1109/ICSA56044.2023.00015.

28.Hedayati Kia, S., Dunai, L., Antonino-Daviu, J. A., & Razik, H. (2025). Real-time digital twins for intelligent fault diagnosis and condition-based monitoring of electrical machines. *Energies*, *18*(17), 4637. https://doi.org/10.3390/en18174637.

29.Fu, C., Gao, C., & Zhang, W. (2023). A digital-twin framework for predicting the remaining useful life of piezoelectric vibration sensors with sensitivity degradation modeling. *Sensors*, *23*(19), 8173. https://doi.org/10.3390/s23198173.

30.Baida, V., & Velihorskyi, O. (2025). Metodolohiia diahnostyky aparatnoho zabezpechennia z vykorystanniam informatsiinoi tekhnolohii tsyfrovoho dviinyka [Methodology of hardware diagnostics using digital twin information technology]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii* [Technical Sciences and Technologies], *2*(40), 234–253. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-234-253.

31.Baida, V., & Velihorskyi, O. (2026). Identyfikatsiia parazytnykh parametriv modeli peretvoriuvacha postiinoho strumu henetychnym alhorytmom [Identification of parasitic parameters of DC-DC converter model by genetic algorithm]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii* [Technical Sciences and Technologies], *4*(42), 165–186. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-165-186.

32.Riba, J.-R., Moreno-Eguilaz, M., Bogarra, S., & Garcia, A. (2018). Parameter identification of DC-DC converters under steady-state and transient conditions based on white-box models. *Electronics*, *7*(12), 393. https://doi.org/10.3390/electronics7120393.

Дата першого надходження статті до видання: 18.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 08.01.2026

UDC: 004.942

Vladyslav Baida[1], Oleksandr Velihorskyi[2]

[1]PhD Student of the Department of informational and computer systems
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: Vladyslav.Baida@stu.cn.ua. **ORCID**: https://orcid.org/0009-0004-2172-8057
Google Scholar: https://scholar.google.com/citations?user=J8RjmHwAAAAJ

[2]Professor of the Department of Electronics, Automation, Robotics, and Mechatronics
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: o.veligorskiy@stu.cn.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-8256-7339
Google Scholar: https://scholar.google.com.ua/citations?user=SWbfGzQAAAAJ

INFORMATION TECHNOLOGY FOR HARDWARE DIAGNOSTICS OF DC-DC CONVERTERS BASED ON PHYSICALLY-INFORMED DIGITAL TWINS

The article addresses the critical challenge of ensuring the reliability of power electronics, specifically buck converters, by implementing a diagnostic methodology based on physically-informed digital twin technology. Unexpected failures in DC-DC converters lead to massive economic losses due to equipment downtime. Traditional diagnostic methods face significant

limitations: signal-based techniques are highly sensitive to noise, model-oriented approaches struggle with complex system modeling, and machine learning methods often lack the interpretability required for critical systems. The proposed information technology bridges these gaps by combining mathematical modeling with real-time data analysis. Using PySpice and Ngspice, the authors developed a high-fidelity model that incorporates parasitic parameters, including inductor resistance and capacitor ESR. This model serves as the digital twin's core, enabling the transition from reactive to proactive maintenance.

A key contribution of the study is the systematic construction of a correspondence table. By simulating six degrees of relative parameter changes (from "---" to "+++") for nine input variables, the authors established how deviations in internal components affect four output indicators: mean and pulse values of output voltage and inductor current. The correspondence table building algorithm utilizes a threshold value $\theta = 0.06$.

The methodology was validated using 6,705 experimental measurements obtained through the remote laboratory system based on the Lab Discovery Engine technology. Results demonstrated 100% efficiency in fault detection across all test scenarios, including deviations in PWM duty cycle, input voltage, and load resistance. The accuracy of identifying specific fault causes ranged between 85.1% and 100%, with minor inaccuracies attributed to hardware measurement noise rather than methodological flaws. This implementation provides a robust, interpretable, and computationally efficient framework for the real-time health monitoring of power electronic systems.

***Keywords**: digital twin; information technology; cyber-physical system; hardware diagnostics; predictive maintenance; power electronics; modeling.*

Fig.: 3. Table: 16. References: 32.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-183-194
УДК 004.03:004.9

Сергій Васильович Коваленко[1], Олексій Васильович Красножон[2], Олександр Миколайович Хропатий[3]

[1]аспірант кафедри інформаційних та комп'ютерних систем, група АСД-122-23
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: kovalenkoptp10@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0003-6993-010X

[2]кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: wingcommander2011@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-2500-254X
Scopus Author ID: 57190377188

[3]викладач кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: alexhropatiy@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-1979-4114
Scopus Author ID: 57221684314

ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ПОКАЗІВ ЛІЧИЛЬНИКІВ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

Запропонована стаття присвячена дослідженню архітектури інформаційної системи моніторингу даних з лічильників теплової енергії із застосуванням технологій Інтернету речей (IoT). Розглядаються ключові компоненти: шлюзова інфраструктура для передачі даних, протоколи та технології зв'язку (LoRaWAN, NB-IoT, MQTT), а також компоненти серверної частини для обробки, зберігання і візуалізації інформації. Наведено опис функціональних модулів та запропоновано алгоритми обробки даних у реальному часі. Проведено аналіз існуючих рішень, виділено недоліки та обґрунтовано вибір архітектурного підходу.

Ключові слова: *Інтернет речей; моніторинг теплової енергії; лічильники тепла; LoRaWAN; NB-IoT; MQTT; обробка даних; архітектура інформаційної системи.*

Рис.: 5. Бібл: 18.

Актуальність теми дослідження. Запровадження систем дистанційного моніторингу споживання теплової енергії є одним із пріоритетних напрямів енергоменеджменту для підвищення ефективності використання ресурсів та зменшення експлуатаційних витрат. Зростання цін на паливно-енергетичні ресурси, а також необхідність скорочення викидів парникових газів змушують підприємства теплопостачання, ОСББ і керівників бюджетних установ впроваджувати інтелектуальні засоби контролю за використанням теплової енергії. Інтеграція технології Інтернету речей (IoT – Internet of Things) у сфері обліку та моніторингу лічильників тепла дозволяє автоматизувати процеси збору даних, своєчасно виявляти аварійні ситуації, а також оптимізувати тарифи та графіки подачі теплоносія. В умовах сучасних викликів енергоефективності, цифровізації мереж і переходу до «розумних» міст питання розробки надійних та масштабованих інформаційних систем моніторингу стає особливо актуальним.

Постановка проблеми. Попри широке розповсюдження електронних лічильників теплової енергії, у багатьох операторів теплопостачання відсутні єдині централізовані рішення для збору й аналізу даних у реальному часі. Основні проблеми полягають у такому:

– виробники лічильників використовують власні протоколи й формати передачі даних, що ускладнює їх інтеграцію в єдину систему;

– використання GSM/GPRS або інших традиційних технологій може призводити до затримок у передачі даних, високих експлуатаційних витрат і нестабільності з'єднань;

– при збільшенні кількості пристроїв (лічильників) значно зростають вимоги щодо пропускної здатності мережі та обчислювальних ресурсів серверної частини;

– передача конфіденційної інформації споживачів потребує надійних механізмів шифрування та автентифікації на кожному рівні;

© С. В. Коваленко, О. В. Красножон, О. М. Хропатий, 2026

– обмеженість лише стандартними звітами, тоді як потреба в аналітичній обробці великих обсягів історичних даних вимагає впровадження складніших алгоритмів (прогнозування, виявлення аномалій, побудова графіків).

Таким чином, створення інформаційної системи, здатної працювати із лічильниками тепла різних виробників, забезпечувати безперервний обмін даними у реальному часі, їх обробку, зберігання і візуалізацію, а також гарантування безпеки даних та зі здатністю до масштабування є актуальною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останніми роками вітчизняні та зарубіжні науковці приділяють значну увагу впровадженню IoT-рішень у сфері енергоменеджменту, зокрема:

1. IoT-архітектури для енергетичного моніторингу. У джерелах [1-3] наведено огляд різноманітних IoT-платформ (Azure IoT, AWS IoT, Google Cloud IoT), описано їх можливості щодо збору даних із лічильників, а також інтеграції із існуючими SCADA-системами. Дослідження показують, що застосування хмарних технологій дозволяє забезпечити майже необмежене сховище даних, засоби обробки потокових даних (stream processing).

2. Протоколи зв'язку для IoT у сфері ЖКГ. У роботах [4, 5] розглянуто переваги та недоліки таких технологій, як LoRaWAN, NB-IoT, Sigfox та LTE-M для комунікації із лічильниками теплової енергії. Зокрема, технологія LoRaWAN демонструє низьке енергоспоживання та великий радіус дії, але обмежену пропускну здатність, тоді як NB-IoT забезпечує хороший зв'язок у приміщеннях, але вимагає підтримки оператором мережі мобільного зв'язку.

3. Безпека в IoT-мережах. Дослідження [6, 7] показали, що впровадження стандартизованих механізмів захисту (TLS/DTLS, MQTT over TLS, використання сертифікатів) є обов'язковим для запобігання несанкціонованому доступу до даних. Автори наголошують на необхідності використання засобів автентифікації на основі PKI (Private Key Infrastructure) та актуалізації прошивок, що підвищує стійкість системи до кіберзагроз.

4. Методи обробки та зберігання даних. У статтях [8-10] описано рішення на базі NoSQL-сховищ (MongoDB, InfluxDB) для зберігання великих масивів метрологічних даних із можливістю швидкого запису та читання. Додатково наведено приклади використання потокових систем обробки (Apache Kafka, Apache Flink) для агрегації і попереднього аналізу даних у реальному часі.

5. Візуалізація і аналітика. У роботах [11, 12] розглянуто інструменти інформаційних панелей (Grafana, Kibana, Power BI) та механізми машинного навчання для виявлення аномалій та прогнозування споживання енергії. Автори відзначають, що регулярне використання аналітичних звітів допомагає оптимізувати витрати на теплопостачання і вчасно виявляти витоки теплоносія.

6. Інформаційні системи для ЖКГ в Україні. У [13] оцінено існуючі рішення українських розробників щодо моніторингу лічильників тепла та холодної води. Зазначено, що більшість систем не є повністю масштабованими та не інтегруються з іншими аналітичними платформами, а часто орієнтовані лише на окремі протоколи (Modbus, MBus).

Загалом аналіз останніх публікацій підтверджує, що питання побудови універсальної та безпечної IoT-інфраструктури для моніторингу теплової енергії не є повністю закритим, а отже, потребує подальшого наукового та прикладного дослідження.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Незважаючи на значний прогрес у сфері IoT-рішень, залишаються відкритими наступні проблеми:

1. Уніфікація форматів даних для лічильників різних виробників. Відсутність єдиного підходу до структури пакетів даних ускладнює процес їх обробки та масштабування системи.

2. Гнучка архітектура шлюзової частини. Необхідно дослідити можливість одночасної підтримки декількох стандартів (LoRaWAN, NB-IoT, Ethernet) з автоматичним перемиканням залежно від умов мережі.

3. Оптимальні стратегії енергозбереження для автономних вузлів вимірювання. У більшості досліджень аналізуються індивідуальні рішення, але відсутні загальні рекомендації щодо конфігурації периферійних пристроїв з урахуванням особливостей клімату та рельєфу.

4. Інтелектуальна аналітика на рівні граничних обчислень (Edge Computing). Потрібно оптимізувати алгоритми первинної обробки даних (фільтрація, агрегація) на самому пристрої або шлюзі, щоб зменшити навантаження на канал зв'язку та обчислювальний вузол.

Таким чином, виникає потреба в дослідженні моделей інформаційної системи та вибір тієї яка б враховувала зазначені недоліки й могла б бути адаптована до різних умов експлуатації.

Мета статті. Метою даної статті є обґрунтування архітектури інформаційної системи моніторингу даних, що отримуються від лічильників теплової енергії на основі технології Інтернету речей, яка забезпечить:

– уніфікований збір даних від пристроїв різних виробників за допомогою шлюзів із підтримкою технологій LoRaWAN, NB-IoT, Ethernet та MQTT;

– надійну передачу даних від пристроїв до серверної частини із мінімальною затримкою та гарантією доставки;

– обробку і зберігання великих обсягів метрологічної інформації із можливістю гнучкого масштабування;

– захист даних і безпеку системи на всіх рівнях (пристрій, шлюз, сервер, хмарний сервіс);

– інструменти аналітики та візуалізації, що дозволять у реальному часі відстежувати споживання теплової енергії, виявляти аномалії та прогнозувати навантаження.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо основні архітектурні елементи (шари), із яких складається типова багаторівнева система моніторингу приладів обліку теплової енергії, яку зображено на рисунку 1.

Шар вимірювальних пристроїв та сенсорів (Device Layer) складається із:

– електронних лічильників теплової енергії з інтерфейсом MBus/RS485;

– додаткових безконтактних датчиків (температури, тиску, витрати теплоносія) для розширеної аналітики;

– вбудованих модулів зв'язку (LoRa, NB-IoT, LTE-M або Ethernet) та мікроконтролерів (STM32, ESP32, nRF52) із підтримкою протоколу MQTT.

Шлюзовий шар (Gateway Layer) містить у собі:

– шлюзи із технологією LoRaWAN (Log Range Wide Area Network) для підключення великої кількості пристроїв із малим енергоспоживанням;

– модулі NB-IoT (Narrow Band Internet of Things) для підвищення надійності з'єднання в умовах міської забудови;

– Ethernet-шлюзи для прямого підключення лічильників до локальної мережі.

Шлюзи виконують роль проміжного вузла, агрегують дані від пристроїв, здійснюють попередню обробку (Edge Computing), шифрують пакети й передають їх у хмару або локальний сервер.

Мережевий шар (Communication Layer) представлено:

– протоколами зв'язку LoRaWAN, NB-IoT;

– протоколом MQTT (Message Queue Telemetry Transport), що забезпечує обмін повідомленнями «публікація/підписка»;

– протоколами TLS/DTLS для шифрування даних у транспортному шарі;

– брокер MQTT (наприклад, Mosquitto або EMQX) для маршрутизації повідомлень;

– модулі обробки реального часу (Apache Kafka, Apache Flink, чи локальні сервіси на основі Node.js);

– бази даних: Time-series DB (InfluxDB, TimescaleDB) для зберігання метрологічних даних із записами (від 1 запису/хвилину до 1 разу/секунд) та NoSQL (MongoDB) для зберігання довідкових даних (інформація про прилади, користувачів, геодані).

Прикладний (аналітичний і візуалізаційний) шар (Applied Layer) утворюють:

– мікросервіси для реалізації бізнес-логіки (Java, Node.js, Python/Flask);

– DWH (Data Warehouse) для накопичення агрегаційних даних;

– інформаційні панелі (Grafana, Power BI, Tableau) для візуалізації трендів споживання, звітів про витоки, прогнозів тощо.

– мобільний і вебінтерфейси для кінцевих користувачів (React, Angular).

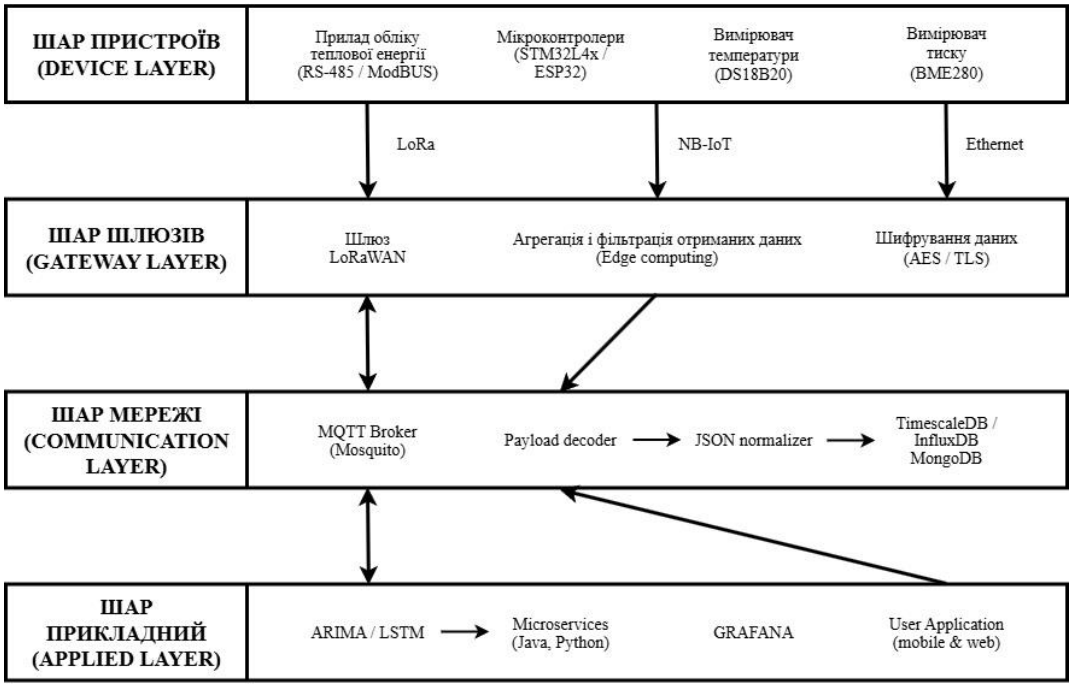


Рис. 1. Архітектурна система моніторингу показів лічильників теплової енергії
Джерело: отримано авторами.

Сенсорні модулі та пристрої збору даних. Для реалізації шару Device Layer запропоновано використовувати комерційні теплові лічильники із відкритим інтерфейсом MBus або RS485. Структуру сенсорного модуля показано нижче, на рис. 2.

Мікроконтролер (MCU) STM32L4x або ESP32:

– ESP32 має інтегрований Wi-Fi/Bluetooth та можливість розширення LoRa або NB-IoT модулями;

– STM32L4x має низьке енергоспоживання, достатньо периферії (UART, I2C, ADC) для підключення датчиків.

Модулі зв'язку:

– LoRa SX1276 (868 МГц) для передачі пакетів розміром до 256 байт з дальністю до 5 – 10 км у сільській місцевості;

– NB-IoT (modem Quectel BC95) для підключення до мережі мобільного оператора: мінімальна затримка 1–2 секунди; підтримка міграції між базовими станціями; низьке енергоспоживання в режимі очікування (Stand-by) (< 10 *мкА*).

Датчики. Окрім вбудованого вимірювача об'єму теплоносія, пропонується інсталювати:

1. Температурний датчик DS18B20 (з абсолютною похибкою у ±0,5 °C), для точного цифрового вимірювання температури в широкому діапазоні (від -55°C до +125°C) у різних умовах, зокрема у вологих середовищах завдяки водонепроникному корпусу.

2. Датчик витрати (оптичний або ультразвуковий) для уточнення даних у критичних зонах.

Усі датчики під'єднуються до MCU через шину I2C (BME280), 1-wire (DS18B20) або ADC (аналого-цифровий перетворювач) для ультразвукового датчика.

Для забезпечення автономності сенсорного модуля пропонується використовувати акумуляторні батареї LiPo (3,7 В, 2000 мАг) із фотоелектричним перетворювачем енергії потужністю 5 Вт для підтримки автономності.

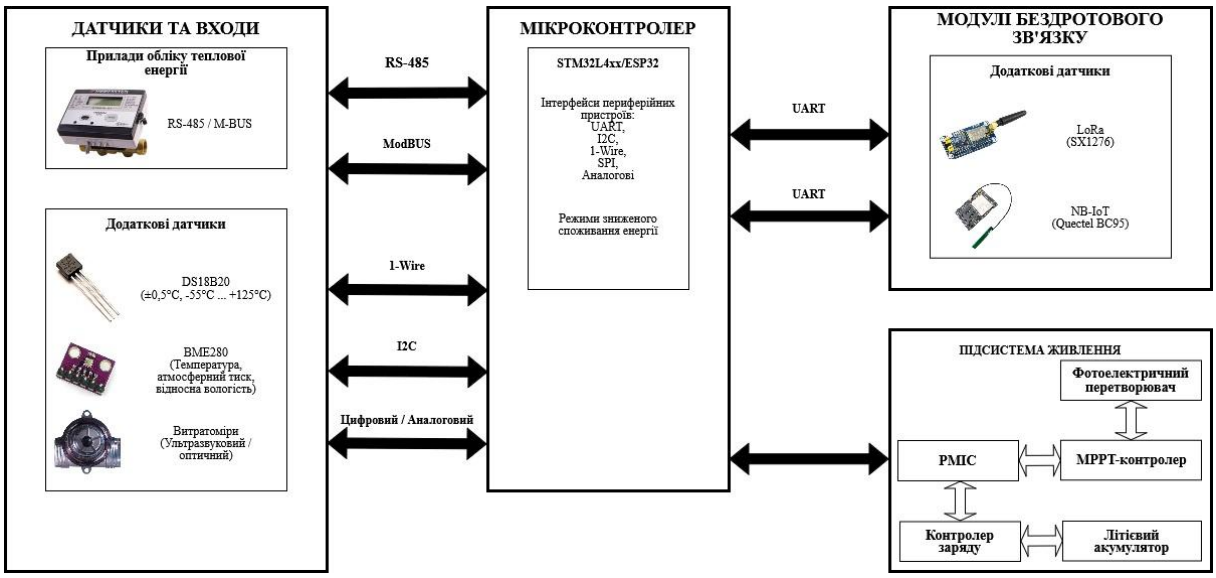


Рис. 2. Структурна сенсорного модуля системи моніторингу показів лічильників теплової енергії

Джерело: отримано авторами.

Проведемо розрахунок часу автономної роботи запропонованого сенсорного модуля. Середній струм споживання пристрою (I_{avg}) з урахуванням всіх ключових робочих режимів можна визначити за формулою:

$$I_{avg} = \frac{I_{sl} \cdot T_{sl} + I_{act} \cdot T_{act} + I_{tx} \cdot T_{tx}}{T_{cycle}}, \quad (1)$$

де I_{sl} – струм в режимі зниженого енергоспоживання (сну);

I_{act} – струм в режимі активного прийому даних;

I_{tx} – струм в режимі активної передачі даних через NB-IoT/LoRa;

T_{sl} – час перебування в режимі зниженого енергоспоживання;

T_{act} – час перебування в режимі активного прийому даних;

T_{tx} – час перебування в режимі активної передачі даних;

T_{cycle} – загальний час однієї ітерації роботи модуля.

Припустимо, що сенсорний модуль здійснює передачу необхідних параметрів раз на 15 хвилин (тобто T_{cycle} складає 900 с). При цьому, T_{sl} становить 893 с, T_{act} – 5 с і T_{tx} – 2 с, I_{sl} складає 1,5 мА, I_{act} – 25 мА, I_{tx} – 120 мА. Тоді, зігдно з (1), отримаємо:

$$I_{avg} = \frac{1{,}5 \cdot 893 + 25 \cdot 5 + 120 \cdot 2}{900} = \frac{1704{,}5}{900} \approx 1{,}893(8). \quad (2)$$

Як видно із (2), середній струм споживання сенсорного модуля складає приблизно 1,9 мА. Якщо обрати акумулятор ємністю 2000 мАг, теоретичний час автономної роботи (Т) складатиме:

$$T = \frac{2000}{1{,}9} \approx 1052{,}63 год \approx 43{,}86 діб. \quad (3)$$

З урахуванням саморозряду акумулятора, енергетичних втрат на перетворення напруги та інших видів втрат, зазначений у (3) час автономної роботи буде явно меншим. Однак проведений розрахунок дозволяє обґрунтовано стверджувати, що гарантований час повністю автономії роботи модуля (за відсутності сонячної генерації) складатиме 30 діб.

Протоколи зв'язку та шлюзова інфраструктура. Шлюзи виконують роль проміжного елемента між групою сенсорних вузлів та серверною частиною. Вибір технологій комунікації ґрунтується на таких критеріях: дальність, пропускна здатність, вартість обслуговування, енергоспоживання.

LoRaWAN працює у частотному діапазоні 868 МГц (ЄС) із шириною каналу у 125 кГц. Переваги: передача даних у відкритій місцевості до 10 км; низьке енергоспоживання пристроїв класу A та B; підтримка масштабування до десятків тисяч вузлів.

Принцип роботи LoRaWAN-мережі є такими [14]:

1. Сенсорний вузол формує дані (температура, витрата, тиск, ідентифікатор лічильника) й шифрує їх за допомогою AES-128.

2. LoRa-модуль передає зашифрований пакет на найближчий шлюз (базову станцію).

3. Шлюз отримує сигнал, додає метадані (RSSI, SNR, часову мітку) та надсилає через Ethernet або 4G/LTE канал до локального сервера або хмарного брокера LoRaWAN (TheThingsNetwork, ChirpStack).

4. Брокер здійснює демоделювання, автентифікацію пристрою, а потім передає чистий набір даних до MQTT-брокера для дальшої обробки.

NB-IoT (NarrowBand-IoT) – технологія мобільного зв'язку, що використовує вузьку смугу (200 кГц). Переваги: інтеграція в мережі GSM/UMTS/LTE операторів; краща проникність сигналу у приміщення; вища надійність доставки повідомлень.

LTE-M (Cat-M1) забезпечує вищу швидкість передачі (до 1 Мбіт/с), проте витрати енергії дещо більші, ніж у NB-IoT. Рекомендовано використовувати NB-IoT для малочастотних передавань (1 запис/10 хвилин) і LTE-M для більш частих оновлень, наприклад, в режимі реального часу.

MQTT (Message Queue Telemetry Transport) – легкий протокол «публікація/підписка» на базі TCP/IP. Для передачі даних зі шлюзу до серверного кластера використовується MQTT over TLS: порт 8883 (TLS) для безпечного зв'язку; автентифікація за допомогою ключа клієнта (client ID) та пароля або сертифікатів.

MQTT-брокер (Mosquitto чи EMQX) отримує повідомлення і публікує їх у внутрішню чергу обробки.

Оскільки комунікаційні стандарти (MQTT, LoRaWAN) забезпечують лише транспортування даних, в архітектуру системи (рисунок 1) впроваджено Payload Decoder. Він автоматично перетворює вхідні бінарні пакети (Hex) пропрієтарних форматів конкретних виробників лічильників (наприклад, M-Bus) в уніфікований формат JSON.

Отримані через MQTT дані потрапляють у модуль Stream Processor (реалізований, наприклад, на базі Apache Kafka + Kafka Streams або Apache Flink). В цьому модулі вирішуються завдання:

– фільтрація шумових пакетів;

– агрегація даних у часові інтервали (наприклад, обчислення середньої температури за одну годину);

– маркування даних тегами (з геолокацією, типом приміщення, категоріями споживання);

– виявлення аномалій за простими пороговими алгоритмами.

Сховище даних і управління метаданими:

1. Time-series DB (InfluxDB). Оптимізована для швидкого запису та сканування за часовими зрізами. Дозволяє зберігати мільйони записів на день для кожного регіону.

2. NoSQL (MongoDB). Зберігає довідкову інформацію про прилади, користувачів, налаштування зон (географічні координати, назви будинків), профілі споживання (квартири, котельні).

Для розподіленої роботи баз даних застосовано реплікацію (кластери InfluxDB Enterprise, MongoDB Replica Set) і шардінг (множинні шарди для Time-series DB), що забезпечує високу доступність та відмовостійкість.

Аналітичні алгоритми та модулі машинного навчання. Для реалізації інтелектуальних функцій у системі розгорнуто окремий мікросервіс на базі Python (FastAPI). Він отримує нормалізовані дані у форматі JSON безпосередньо від JSON Normalizer, що забезпечує незалежність аналітики.

Мікросервіс виконує такі ключові завдання:

1. Прогнозування споживання. Для реалізації короткострокового прогнозування навантаження у систему інтегровано моделі ARIMA (для стабільних лінійних трендів) та нейромережі LSTM (для складних патернів). Критично важливим етапом перед навчанням моделей є автоматичне очищення історичних даних від шумів та аномалій (на шарі Stream Processor), що суттєво підвищує точність. Експериментальна верифікація моделей на тестовій вибірці (рис. 3) продемонструвала високу ефективність обраного підходу. Середня абсолютна відсоткова похибка (MAPE) склала 4,2–4,8%.

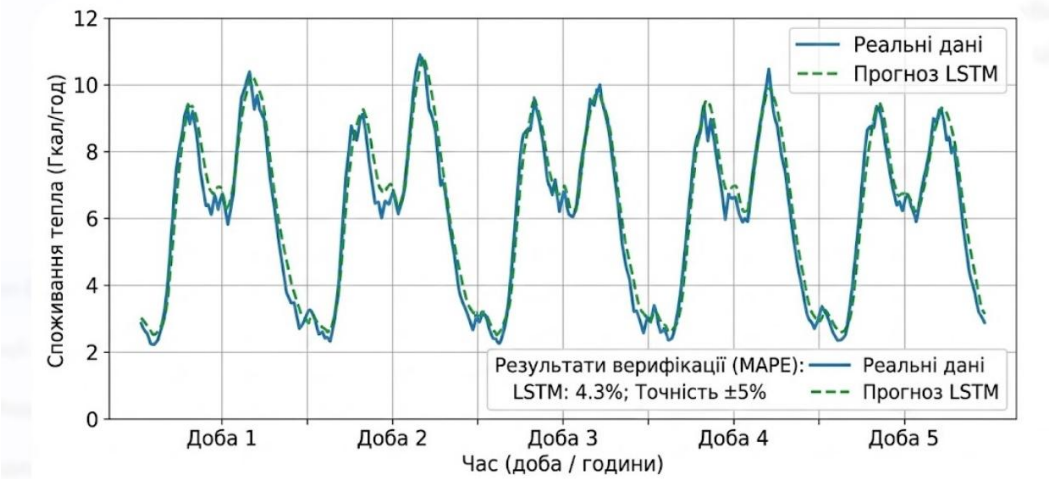


Рис. 3. Порівняння реальних та прогнозних даних споживання тепла на моделі LSTM

Джерело: отримано авторами.

2. Виявлення витоків та аномалій. Використання алгоритмів *K*-means для кластеризації типових профілів споживання і виявлення “аномальних” патернів (наприклад, різке зростання витрати теплоносія без зміни температури).

3. Оптимізація режимів роботи котелен. Розрахунок рекомендованої температури подачі для теплопунктів, виходячи з прогнозованого попиту, поточної зовнішньої температури та динамічних тарифів.

Бази моделей зберігаються у форматі Pickle (скрипти Python), завантажуються в оперативну пам’ять при запуску сервісу й оновлюються автоматично за розкладом (один раз на добу) через механізм CI/CD (GitLab CI).

Віртуалізація та масштабування. Для забезпечення гнучкості, систему розгорнуто в контейнерах Docker (компоненти: Mosquitto, Kafka, Zookeeper, Kafka Streams, InfluxDB, MongoDB, мікросервіси Python). Розподіл контейнерів по вузлах кластера виглядає наступним чином:

1. AUTO-SCALING (Horizontal Pod Autoscaler). Тут активуються додаткові репліки сервісів згідно з навантаженням CPU або обсягу вхідного потоку повідомлень.

2. Резервне копіювання (Backups): щоденне зберігання вмісту БД; резервних копій у S3-сумісному сховищі.

Цей підхід забезпечує можливість обслуговувати одночасно до 50 000 активних пристроїв без втрати швидкодії.

З метою перевірки здатності підтримувати стабільну роботу системи при заявленому навантаженні було проведено навантажувальний тест. Тест проходив на трьох потужних віртуальних серверах, які працювали спільно. Щоб уникнути збоїв, усі частини системи було продубльовано. Налаштування цієї перевірки наведено нижче в табл. 1.

Таблиця 1 – Параметри сценарію навантажувального тестування

Параметр	Значення	Коментар
Інструмент тестування	Locust v2.15	Імітація розподіленого навантаження
Протокол зв'язку	MQTT через TCP	Базовий транспорт для сенсорів
Кількість імітованих пристроїв	50 000	Цільове навантаження
Темп приросту пристроїв	~13.8 пристроїв/*с*	Лінійне зростання до максимуму за 60 *хв*
Розмір корисного навантаження	150 байт	Типовий JSON-пакет
Інтервал відправки даних	900 *с* (15 *хв*)	Стандартний режим
Сумарний вхідний потік	~55.5 повідомлень/*с*	Розрахункове навантаження на брокер

Джерело: отримано авторами.

Сценарій дозволив створити технічно обґрунтоване навантаження, яке відповідає реальним умовам експлуатації масової системи моніторингу.

Основною метою тестування було визначення динаміки змін часу відгуку системи та споживання ресурсів при лінійному зростанні кількості пристроїв. Результати верифікації наведені на рис. 4.

При лінійному зростанні кількості пристроїв пропускна здатність також зростає лінійно, досягаючи стабільного значення ~55-56 повідомлень/с. При цьому середня затримка MQTT-брокера при обробці вхідних повідомлень залишається стабільною і при максимальному навантаженні складає ~180 *мс*, що знаходиться значно нижче критичного порогу у 250 *мс*.

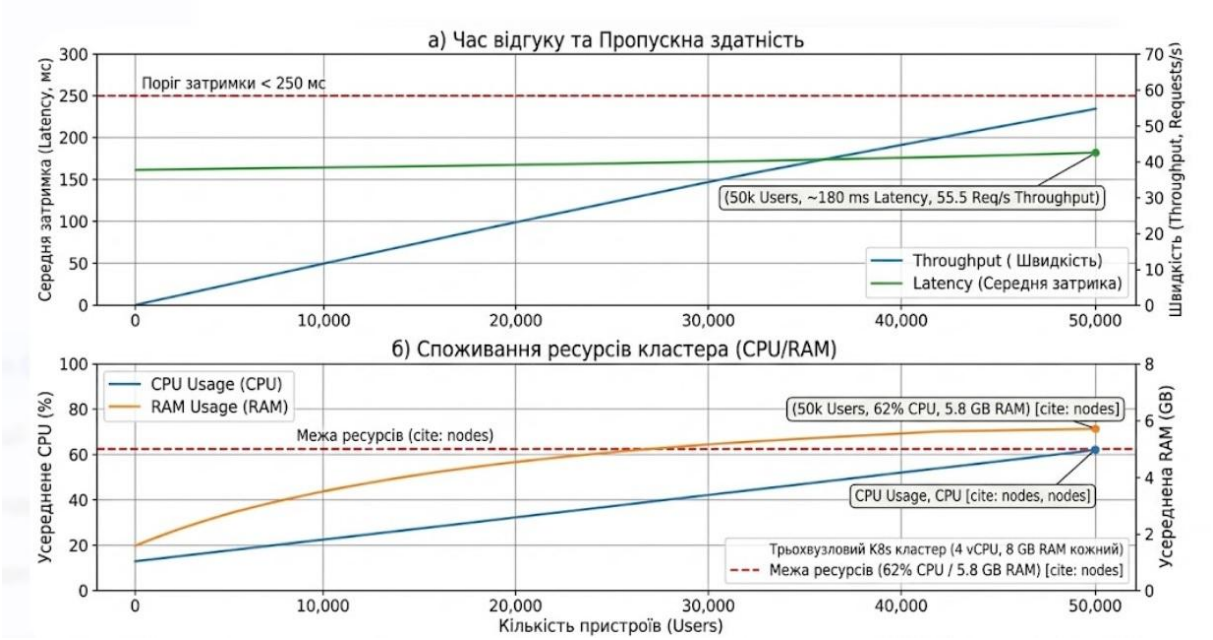


Рис. 4. Динаміка продуктивності системи при лінійному зростанні навантаження до 50 000 пристроїв:
а – середня затримка (Latency) та пропускна здатність;
б – усереднене споживання ресурсів кластера (CPU/RAM)

Джерело: отримано авторами

Споживання ресурсів зростає кореляційно до кількості пристроїв. При 50 000 пристроїв усереднене завантаження CPU по кластеру складає ~62 %, а використання RAM – приблизно 5,8 ГБ (що становить близько 72,5 % від доступних 8 ГБ на вузол). Важливо, що динаміка RAM показує стабілізацію без ознак витоків пам'яті.

Відсоток втрачених пакетів залишався нульовим протягом усього 60-хвилинного тесту.

Отримані дані експериментально підтверджують ефективність обраної мікросервісної архітектури та оркестрації контейнерів, доводячи її здатність масштабуватися до 50 000 пристроїв без втрати швидкодії.

Інтерфейси користувача та візуалізація даних. Користувацький інтерфейс та візуалізація даних в подальшому будуть розроблені із використанням інструментів Grafana та React з D3.js для забезпечення користувачів інформацією, включаючи оглядові панелі, детальні дані пристроїв, аналітику та систему оповіщень.

Висновки. За результатами дослідження інформаційної системи моніторингу даних з лічильників теплової енергії на основі технології Інтернету речей, можна зробити наступні висновки:

1. Уніфікація протоколів. Використання LoRaWAN і NB-IoT для передачі даних дозволяє інтегрувати пристрої різних виробників із єдиною системою збору.

2. Гнучкість та масштабованість. Завдяки контейнеризації та оркестрації Kubernetes система може обслуговувати десятки тисяч пристроїв без втрати продуктивності.

3. Безпека даних. Реалізація MQTT over TLS, шифрування на периферії AES-128 і централізована система керування сертифікатами гарантують цілісність та конфіденційність інформації.

4. Аналітика та прогнозування. Використання моделей машинного навчання для прогнозування споживання із похибкою у ±5 % дозволяє оптимізувати режими роботи котелень і знизити витрати енергії на 8-10 %.

5. Економічна ефективність. Автономні сенсорні модулі з режимом Deep Sleep і сонячними панелями забезпечують безперебійне функціонування до 30 днів без підзарядки, що зменшує експлуатаційні витрати на обслуговування обладнання.

Список використаних джерел

1. Nico Rothämel Managing Director, Wärmeversorgung Sollstedt GmbH OPTIMIZE DISTRICT HEATING NETWORK–REDUCE CO2 EMISSIONS AND COSTS (n.d.). URL: https://www.diehl.com/metering/en/products-solutions/solutions/heating-cooling-solutions/fernwaerme-effizienter-bereitstellen-energie-forcast-management/.

2. Zhou, Q., Peng, W., Zhang, Q., & Mao, Q. (2020). Security and privacy for smart IoT: Current solutions and future directions. *IEEE Internet of Things Journal*, *7*(6), 4842–4854. https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2964052.

3. Sharma, B. K. (2025). Internet of Things (IoT) systems: A survey of platforms, protocols, and application frameworks. *Journal of Global Research in Multidisciplinary Studies*, *1*(10), 24–39.

4. Mahamudul Hasan. (n.d.). *ESP32 LoRaWAN Gateway tutorial with sensor node: Example code included*. Embedded There. https://embeddedthere.com/esp32-lorawan-gateway-tutorial-with-sensor-node-connecting-to-thingspeak/.

5. Mansour, M., Gamal, A., Ahmed, A. I., Said, L. A., Elbaz, A., Herencsar, N., & Soltan, A. (2023). Internet of Things: A comprehensive overview on protocols, architectures, technologies, simulation tools, and future directions. *Energies*, *16*(8), Article 3465. https://doi.org/10.3390/en16083465.

6. Sicari, S., Rizzardi, A., Grieco, L. A., & Coen-Porisini, A. (2022). Security, privacy and trust in Internet of Things: The road ahead. *Computer Networks*, *216*, Article 109246. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.109246.

7. Khan, W. Z., Rehman, M. H., Zangoti, H. M., Afzal, M. K., Armi, N., & Salah, K. (2021). Industrial Internet of Things: Recent advances, enabling technologies and open challenges. *Computers & Electrical Engineering*, *81*, Article 106522. https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.106522.

8. Xu, L. D., Lu, Y., & Li, L. (2023). Embedding intelligence in Internet of Things: Data processing and storage perspectives. *IEEE Industrial Informatics Magazine*, *17*(2), 6–17. https://doi.org/10.1109/MII.2022.3211516.

9. Marjani, M., Nasaruddin, F., Gani, A., Karim, A., Hashem, I. A. T., Siddiqa, A., & Yaqoob, I. (2021). Big IoT data analytics: Architecture, opportunities, and open research challenges. *IEEE Access*, *9*, 149234–149262. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2689040.

10. Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2021). Edge computing: Vision and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, *8*(3), 1125–1137. https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2579198.

11. Batty, M., Hudson-Smith, A., Milton, R., & Crooks, A. (2022). Visual analytics for urban digital twins. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, *49*(5), 1265–1282. https://doi.org/10.1177/23998083211046769.

12. Sodhro, A. H., Pirbhulal, S., Luo, Z., & de Albuquerque, V. H. C. (2021). Artificial intelligence driven mechanisms for edge computing-based IoT applications. *IEEE Access*, *9*, 113785–113806. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3104313.

13. Kozlovskyi, O. M., & Petrova, S. V. (2021). Analiz system monitorynhu lichylnykiv resursiv dlia obiednanykh terytorialnykh hromad Ukrainy [Analysis of resource meter monitoring systems for united territorial communities of Ukraine]. *Enerhetyka ta Efektyvnist [Energy and Efficiency]*, (3), 45–53.

14. Teddy Caroni. (2025, February 28). *LoRaWAN: Fonctionnement, avantages et applications clés* [LoRaWAN: Operation, advantages and key applications]. BTIB. https://www.btib.fr/lorawan-fonctionnement-avantages-applications.

References

1. Nico Rothämel Managing Director, Wärmeversorgung Sollstedt GmbH OPTIMIZE DISTRICT HEATING NETWORK–REDUCE CO2 EMISSIONS AND COSTS (n.d.). URL: https://www.diehl.com/metering/en/products-solutions/solutions/heating-cooling-solutions/fernwaerme-effizienter-bereitstellen-energie-forcast-management/.

15. Zhou, Q., Peng, W., Zhang, Q., & Mao, Q. (2020). Security and privacy for smart IoT: Current solutions and future directions. *IEEE Internet of Things Journal*, *7*(6), 4842–4854. https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2964052.

16. Sharma, B. K. (2025). Internet of Things (IoT) systems: A survey of platforms, protocols, and application frameworks. *Journal of Global Research in Multidisciplinary Studies*, *1*(10), 24–39.

17. Mahamudul Hasan. (n.d.). *ESP32 LoRaWAN Gateway tutorial with sensor node: Example code included*. Embedded There. https://embeddedthere.com/esp32-lorawan-gateway-tutorial-with-sensor-node-connecting-to-thingspeak/.

18. Mansour, M., Gamal, A., Ahmed, A. I., Said, L. A., Elbaz, A., Herencsar, N., & Soltan, A. (2023). Internet of Things: A comprehensive overview on protocols, architectures, technologies, simulation tools, and future directions. *Energies*, *16*(8), Article 3465. https://doi.org/10.3390/en16083465.

19. Sicari, S., Rizzardi, A., Grieco, L. A., & Coen-Porisini, A. (2022). Security, privacy and trust in Internet of Things: The road ahead. *Computer Networks*, *216*, Article 109246. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.109246.

20. Khan, W. Z., Rehman, M. H., Zangoti, H. M., Afzal, M. K., Armi, N., & Salah, K. (2021). Industrial Internet of Things: Recent advances, enabling technologies and open challenges. *Computers & Electrical Engineering*, *81*, Article 106522. https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.106522.

21. Xu, L. D., Lu, Y., & Li, L. (2023). Embedding intelligence in Internet of Things: Data processing and storage perspectives. *IEEE Industrial Informatics Magazine*, *17*(2), 6–17. https://doi.org/10.1109/MII.2022.3211516.

22. Marjani, M., Nasaruddin, F., Gani, A., Karim, A., Hashem, I. A. T., Siddiqa, A., & Yaqoob, I. (2021). Big IoT data analytics: Architecture, opportunities, and open research challenges. *IEEE Access*, *9*, 149234–149262. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2689040.

23. Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2021). Edge computing: Vision and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, *8*(3), 1125–1137. https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2579198.

24. Batty, M., Hudson-Smith, A., Milton, R., & Crooks, A. (2022). Visual analytics for urban digital twins. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, *49*(5), 1265–1282. https://doi.org/10.1177/23998083211046769.

25. Sodhro, A. H., Pirbhulal, S., Luo, Z., & de Albuquerque, V. H. C. (2021). Artificial intelligence driven mechanisms for edge computing-based IoT applications. *IEEE Access*, *9*, 113785–113806. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3104313.

26. Kozlovskyi, O. M., & Petrova, S. V. (2021). Analiz system monitorynhu lichylnykiv resursiv dlia obiednanykh terytorialnykh hromad Ukrainy [Analysis of resource meter monitoring systems for united territorial communities of Ukraine]. *Enerhetyka ta Efektyvnist [Energy and Efficiency]*, (3), 45–53.

27. Teddy Caroni. (2025, February 28). *LoRaWAN: Fonctionnement, avantages et applications clés* [LoRaWAN: Operation, advantages and key applications]. BTIB. https://www.btib.fr/lorawan-fonctionnement-avantages-applications.

Дата першого надходження статті до видання: 19.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.01.2026

UDC 004.03:004.9

Serhii Kovalenko[1], Oleksii Krasnozhon[2], Oleksandr Khropatyi[3]

[1]Postgraduate student of the Department of Information and Computer Systems, group ASD-122-23
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: kovalenkoptp10@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0003-6993-010X

[2]PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information and Computer Systems
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: wingcommander2011@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-2500-254X
Scopus Author ID: 57190377188

[3]Lecturer, Department of Information and Computer Systems
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: alexhropatiy@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-1979-4114. **Scopus Author ID:** 57221684314

INFORMATION SYSTEM FOR MONITORING DATA FROM HEAT ENERGY METERS BASED ON THE INTERNET OF THINGS TECHNOLOGY

The proposed article is devoted to the study of the architecture of an information system for monitoring data from heat energy meters using Internet of Things (IoT) technologies.

The implementation of remote monitoring systems for thermal energy consumption is currently one of the priority directions in energy management aimed at increasing resource efficiency and reducing operational costs. In the face of rising fuel and energy prices, as well as the global necessity to reduce greenhouse gas emissions, heat supply enterprises and facility

managers require intelligent tools to control energy usage. The integration of Internet of Things (IoT) technologies allows for the automation of data collection processes, timely detection of accidents, and optimization of heating supply schedules. Therefore, the development of reliable, secure, and scalable information systems for monitoring acts as a critical task for the modernization of municipal infrastructure and the transition to "smart city" concepts.

Despite the widespread use of electronic heat meters, a significant problem remains the lack of unified centralized solutions for real-time data collection and analysis. Existing systems often face challenges such as the incompatibility of proprietary protocols from different meter manufacturers, high operational costs of traditional GSM/GPRS communications, and insufficient scalability. Furthermore, ensuring the security of confidential consumer data and processing large volumes of historical information for predictive analytics requires more advanced architectural approaches than those currently available on the market.

The objective of this article is to justify and design the architecture of an information system for monitoring data received from heat energy meters based on IoT technology. The system aims to ensure unified data collection from heterogeneous devices, reliable transmission with minimal latency, secure processing, and storage of large data volumes, as well as providing tools for visualization and forecasting of heat consumption.

The study proposes a multi-level system architecture consisting of a Device Layer, Gateway Layer, Network Layer, and Application Layer. At the device level, the integration of commercial heat meters with microcontrollers (STM32, ESP32) and additional sensors (DS18B20) is proposed. To ensure energy efficiency and wide coverage, a hybrid communication approach is utilized: LoRaWAN technology is used for long-range transmission (up to 10 km) with low power consumption, while NB-IoT is employed for deep signal penetration in dense urban environments. The system utilizes the MQTT protocol over TLS/DTLS for secure and lightweight data transport. For data processing, a stream processing model (using tools like Apache Kafka) is implemented to filter noise and aggregate readings in real-time. The storage architecture combines Time-series databases (InfluxDB) for high-speed writing of metrological data and NoSQL databases (MongoDB) for managing metadata. The analytical component of the system leverages machine learning algorithms, specifically ARIMA and LSTM models, to forecast heat loads with an accuracy of ±5%, and K-means clustering to detect anomalies such as leaks or unauthorized consumption.

The research concludes that the proposed architecture successfully solves the problem of interoperability between different equipment manufacturers through protocol unification. The combination of LoRaWAN and NB-IoT ensures reliable coverage and extends the autonomous operation of sensor nodes up to 30 days. The use of containerization (Docker) ensures the system's scalability to serve tens of thousands of devices. The implementation of predictive analytics allows for the optimization of boiler house operations, potentially reducing energy costs by 8–10%, which confirms the practical value and economic efficiency of the developed system.

Keywords: Internet of Things; heat energy monitoring; heat meters; LoRaWAN; NB-IoT; MQTT; data processing; information system architecture.

Fig.: 5. References: 18.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-195-215
УДК 629.735.05:004.89

Микола Вікторович Кучерявий[1], Геннадій Миколайович Гулак[2]

[1]аспірант
Інститут проблем математичних машин та систем Національної академії наук України (Київ, Україна)
E-mail: bu9free@gmail.com. **ORCID**: https://orcid.org/0009-0005-0017-9797

[2]доктор технічних наук, професор,
професор кафедри інформаційної та кібернетичної безпеки імені професора Володимира Бурячка
Київський столичний університет імені Бориса Грінченка (Київ, Україна)
Інститут проблем математичних машин та систем Національної академії наук України (Київ, Україна)
E-mail: hulak@kubg.edu.ua. **ORCID**: https://orcid.org/0000-0001-9131-9233

МОДЕЛЬ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ У СИСТЕМІ ПІДТРИМКИ ГАРАНТОЗДАТНОСТІ УПРАВЛІННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

У статті розглянуто проблему забезпечення гарантоздатності систем управління безпілотних літальних апаратів в умовах стохастичних збурень і деградації компонентів. Запропоновано формалізовану модель прийняття рішень у системі підтримки гарантоздатності на основі прогнозу станів, ризик-орієнтованого оцінювання та нечіткої логіки. Введено інтегральний показник гарантоздатності й запас безпечності з прогнозуванням на ковзному горизонті. Моделювання підтвердило зниження ризику та підвищення робастності керування.

Ключові слова: *безпілотні літальні апарати; гарантоздатність; система підтримки прийняття рішень; нечітка логіка; багатокритеріальне оцінювання; прогнозування станів; ризик-орієнтоване керування; інваріантність безпечної множини.*

Рис.: 6. Бібл.: 22.

Актуальність теми дослідження. Стрімке розширення сфер застосування безпілотних літальних апаратів у військових, цивільних, моніторингових та логістичних системах зумовлює підвищені вимоги до стійкості, безперервності та безпечності функціонування їхніх систем управління [1-5]. У сучасних умовах експлуатації БПЛА функціонують у динамічному середовищі невизначеності, що характеризується стохастичними збуреннями, деградацією апаратних і програмних компонентів, ресурсними обмеженнями та потенційними кібернетичними впливами [3-5; 7]. За таких умов традиційні статичні підходи до забезпечення надійності та безпеки керування виявляються недостатніми, оскільки вони не враховують необхідність випереджувального реагування на зміну стану системи та інтегрованого оцінювання ризику.

Актуальність дослідження зумовлена потребою у формалізації процесу прийняття рішень щодо адаптивної зміни режимів функціонування системи управління БПЛА з урахуванням прогнозованих індикаторів стану, багатокритеріального оцінювання ризику та ресурсних обмежень [2-3; 6]. Інтеграція прогнозу, оцінювання ризику та механізму формування керуючих впливів у межах єдиної моделі дозволяє зменшити ймовірність переходу до небезпечної області функціонування та забезпечити баланс між підвищенням рівня безпеки і збереженням ефективності виконання місії.

Порушена в роботі проблема є актуальною для галузі комп’ютерних наук, зокрема для напрямів інтелектуальних систем керування, систем підтримки прийняття рішень, кіберфізичних систем та інформаційної безпеки [7-8]. Результати дослідження відповідають сучасним тенденціям розвитку адаптивного та ризик-орієнтованого керування, інтеграції методів прогнозування, нечіткої логіки та багатокритеріальної оптимізації у складних розподілених системах, що визначає їхню наукову та практичну значущість.

Постановка проблеми. Системи управління безпілотних літальних апаратів функціонують у динамічному середовищі, що характеризується стохастичними збуреннями, деградацією технічних і програмних компонентів, обмеженнями енергетичних та обчислювальних ресурсів, а також потенційними кібернетичними впливами [14; 16]. За таких умов забезпечення гарантоздатності управління потребує своєчасного формування адаптивних керуючих рішень, спрямованих на запобігання переходу системи до небезпечної області функціонування та втрати здатності виконувати місію.

© М. В. Кучерявий, Г. М. Гулак, 2026

Проблема дослідження полягає у відсутності узгодженої формалізованої моделі прийняття рішень, яка б інтегрувала прогнозовану динаміку станів, оцінювання ризику та ресурсні обмеження в єдину процедуру формування адаптивних керуючих впливів. Наявні підходи в контурах керування БПЛА здебільшого базуються на фіксованих порогових механізмах або жорстко визначених алгоритмах перемикання режимів [9–10; 12], що не враховують багатокритеріальний характер задачі — одночасне забезпечення безпеки, стійкості та ресурсної ефективності [3; 15; 20]. У результаті можливі запізнілі реакції на критичні події або надмірні втручання, які негативно впливають на стабільність керування.

Вирішення зазначеної проблеми необхідне для побудови інтелектуальної системи підтримки гарантоздатності управління БПЛА, здатної забезпечити випереджувальний характер реагування, мінімізувати ймовірність перебування в небезпечній області функціонування та підтримувати баланс між рівнем безпеки й ефективністю виконання завдань [5; 14]. Таким чином, актуальною є задача розроблення формалізованої моделі прийняття рішень, що поєднує прогнозні індикатори стану, ризик-орієнтоване багатокритеріальне оцінювання та механізми адаптивного регулювання інтенсивності втручання в контур керування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У дослідженнях систем управління БПЛА останніх років помітно посилився акцент на поєднанні відмовостійкості, гарантування безпечних обмежень та інтелектуалізації прийняття рішень в умовах невизначеності. Значний пласт робіт зосереджено на задачах діагностики та компенсації відмов виконавчих органів, оскільки часткові відмови приводів у мультикоптерах є однією з ключових причин втрати керованості. Зокрема, запропоновано гібридну схему виявлення та ізоляції відмов приводів багатороторного БПЛА, де поєднано модельно-орієнтований EKF і даноорієнтований нейро-нечіткий компонент (extreme learning neuro-fuzzy), що підвищує точність і оперативність FDI за наявності нелінійностей та шумів вимірювань [1].

Паралельно розвиваються підходи, у яких нечітка логіка використовується не тільки для діагностики, а й для адаптації керування під час виконання місії, зокрема в задачах супроводу та відстеження цілей. Показано, що нечіткий регулятор, який коригує керування залежно від динаміки цілі та змін середовища, може підвищувати ефективність трекінгу БПЛА, а інтеграція обчислень на периферії (edge) розглядається як засіб зменшення затримок у контурі [2]. Водночас такі рішення здебільшого орієнтовані на якість керування та не формалізують прийняття рішень у термінах гарантоздатності та маржі до небезпечної області.

Подальший розвиток отримали нечітко-нейромережеві підходи до компенсації невизначеностей у динаміці та підвищення точності траєкторного керування. ANFIS-підсилений підхід у поєднанні зі sliding mode control для квадрокоптера демонструє ефективність адаптації до змін параметрів та зовнішніх збурень [3]. Проте в більшості випадків вихідною величиною залишається керуючий сигнал у контурі стабілізації, а не узгоджена інтенсивність втручання на рівні системи підтримки прийняття рішень, що враховує ризик, ресурсні обмеження та прогноз розвитку ситуації.

Окремим напрямом є застосування методів глибинного навчання для fault-tolerant control і підвищення здатності системи адаптуватися до пошкоджень або відмов у реальному часі. Зокрема, transformer-орієнтований підхід для fixed-wing UAV із механізмами knowledge distillation та in-context adaptation демонструє потенціал швидкої перебудови керування [4]. Такі методи підвищують автономність, однак питання формального зв’язку між прогнозованою деградацією, оцінкою ризику та процедурою прийняття рішень у системі підтримки гарантоздатності залишається недостатньо формалізованим.

Важливим напрямом є також гарантоване забезпечення безпечності через вбудовування обмежень у закон керування. Підхід на основі Control Barrier Functions у поєднанні з глибинним навчанням дозволяє підтримувати інваріантність безпечної множини навіть за наявності невизначеностей і відмов [5]. Разом з тим такі рішення зазвичай реалізують роль «фільтра безпечності» на нижчому рівні керування і не формують повноцінну багатокритеріальну процедуру вибору інтенсивності адаптивного втручання.

З позиції прийняття рішень і багатокритеріальності розвиваються підходи, у яких невизначеність моделюється нечіткими множинами, а рішення формується як компроміс за кількома критеріями. У задачі розподілу завдань між БПЛА запропоновано інтуїційний нечіткий метод двостороннього узгодження, що підвищує якість вибору за неповної інформації [6]. Проте такі постановки стосуються планування місії, а не підтримки гарантоздатності контуру керування в реальному часі.

Подібні принципи ієрархічного нечіткого прийняття рішень застосовано і в задачах виявлення загроз у Counter-UAV системах на основі злиття сенсорної інформації [7]. Хоча ці підходи демонструють ефективність у класифікації загроз, вони не розв’язують проблему узгодженого вибору керуючого втручання в контурі управління БПЛА з урахуванням прогнозу деградації, ресурсних обмежень та вимог гарантоздатності.

Отже, аналіз сучасних публікацій [1–7] свідчить про активний розвиток методів FDI/FTC, нечітко-нейромережевих механізмів адаптації та safety-critical керування. Водночас залишається недостатньо опрацьованим питання побудови формалізованої моделі прийняття рішень саме у системі підтримки гарантоздатності управління БПЛА, у якій прогнозований запас безпечності до небезпечної області, ризик та ресурсні обмеження інтегруються в єдину нечітку процедуру формування інтенсивності адаптивного втручання з подальшою верифікацією через числовий експеримент.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Аналіз сучасних досліджень [1–7] показує активний розвиток методів FDI/FTC, нечітко-нейромережевих регуляторів і підходів до забезпечення інваріантності безпечної множини. Проте ці рішення переважно зосереджені на рівні низькорівневого керування або окремих задачах планування і не формалізують прийняття рішень у системі підтримки гарантоздатності на метарівні відносно автопілота.

Недостатньо дослідженим залишається інтегроване поєднання прогнозування станів, оцінювання ризику, маржі до небезпечної області та ресурсних обмежень у єдиній багатокритеріальній процедурі формування інтенсивності адаптивного втручання. Відсутня узгоджена формалізована модель, яка б описувала стан прийняття рішень компактним вектором індикаторів і забезпечувала стабільність керуючих дій з мінімізацією перебування системи в небезпечній області. Таким чином, невирішеною частиною проблеми є розроблення інтегрованої моделі прийняття рішень у системі підтримки гарантоздатності управління БПЛА, що поєднує прогноз, ризик-орієнтоване оцінювання та адаптивне регулювання втручання.

Мета дослідження. Метою дослідження є розроблення формалізованої моделі прийняття рішень у системі підтримки гарантоздатності управління безпілотних літальних апаратів на основі інтеграції прогнозних індикаторів стану, багатокритеріального оцінювання ризику та нечіткої логіки регулювання інтенсивності адаптивного втручання; для її досягнення передбачено формалізацію стану прийняття рішень у вигляді компактного вектора індикаторів (запас безпечності до межі небезпечної області, рівень ризику, кібернетичні впливи, ресурсні обмеження), розроблення математичної моделі визначення небезпечної області функціонування та показника запасу безпечності, побудову нечіткої багатокритеріальної моделі вибору інтенсивності втручання, створення імітаційної моделі функціонування системи управління та проведення порівняльного

аналізу ефективності запропонованого підходу з базовими пороговими методами за показниками перебування в небезпечній області, стабільності рішень і вартості втручань.

Виклад основного матеріалу. У розділі послідовно формалізовано модель прийняття рішень у системі підтримки гарантоздатності (СППР) управління БПЛА. Логіка побудови така: спочатку описується дискретна динаміка об'єкта та базового автопілота [9; 12; 14], далі вводиться інтегральний показник гарантоздатності як узагальнена оцінка якості функціонування [10], визначається запас безпечності щодо критичної межі, а потім формуються прогнозні та ризик-орієнтовані індикатори [17]. На їх основі СППР визначає інтенсивність адаптивного втручання, що реалізується через модифікацію параметрів/режимів роботи автопілота. Завершальними елементами є формалізація безпечної множини, редукована динаміка гарантоздатності та числова верифікація.

Формалізація динамічної моделі системи управління

Для опису руху та керованості БПЛА введемо дискретну модель стану, що відповідає цифровій реалізації контурів керування з фіксованим кроком дискретизації [9, 12]. Така форма зручна для інтеграції з телеметрією та алгоритмами підтримки прийняття рішень, які працюють у дискретному часі [8; 11]. Систему управління БПЛА розглянемо як нелінійну дискретну динамічну систему:

$$x(t+1) = f(x(t),\, u_c(t), w(t)), \tag{1}$$

де t – номер дискретного кроку керування;

$x(t) \in \mathbb{R}^n$ – вектор стану БПЛА (наприклад, координати, лінійні швидкості, кути орієнтації, кутові швидкості та їх похідні залежно від вибраної моделі);

$u_c(t)$ – керуючий сигнал базового автопілота (вектор команд на виконавчі органи/тягу);

$w(t)$ – вектор збурень і неврахованих впливів, який узагальнює зовнішні фактори (вітер, турбулентність), деградації та відмови, а також можливі кібернетичні впливи на вимірювання чи канал керування [16; 20; 22].

Оператор $f(\cdot)$ описує нелінійну еволюцію стану за один крок дискретизації та може враховувати аеродинаміку, затримки, насичення та обмеження виконавчих органів. Практично рівняння (1) задає "фізичний" рівень системи, який СППР не замінює, а доповнює механізмом адаптації режиму роботи автопілота.

Щоб не руйнувати стабільність базового контуру, СППР не формує керування "з нуля". Натомість вона задає параметр інтенсивності втручання, який змінює структуру або налаштування автопілота в межах дозволених режимів (наприклад, "номінальний", "захищений", "безпечний") [15; 20]. Система підтримки прийняття рішень не генерує безпосередньо $u_c(t)$, а формує коефіцієнт адаптивного втручання:

$$u_c^*(t) = \Phi(u_c(t), u(t)), \tag{2}$$

де $u(t) \in [0,1]$ – нормована інтенсивність адаптивного втручання (0 – відсутність втручання, 1 – максимальний рівень, який допускається політикою безпеки/ресурсними обмеженнями);

$u_c^*(t)$ – модифікований керуючий сигнал, який фактично подається на об'єкт після врахування рішення СППР.

Оператор $\Phi(\cdot)$ є механізмом реалізації рішення СППР і може відповідати: масштабуванню коефіцієнтів регулятора, обмеженню команд/динаміки, перемиканню між наперед визначеними режимами автопілота. Таким чином, СППР впливає на керування на "метарівні", підвищуючи безпечність і стійкість без повної заміни базового алгоритму.

Такий підхід забезпечує збереження структурної цілісності базового контуру керування та виключає виникнення різких перехідних процесів, пов'язаних із повною зміною алгоритму регулювання [9; 15]. Адаптивний коефіцієнт $u(t)$ виступає регульованим параметром надбудови, який дозволяє плавно змінювати жорсткість або консервативність

керування залежно від поточного рівня ризику та запасу безпечності [17]. У результаті реалізується принцип ієрархічного керування, за якого СППР здійснює корекцію на метарівні, забезпечуючи баланс між ефективністю виконання місії та гарантіями безпечного функціонування системи.

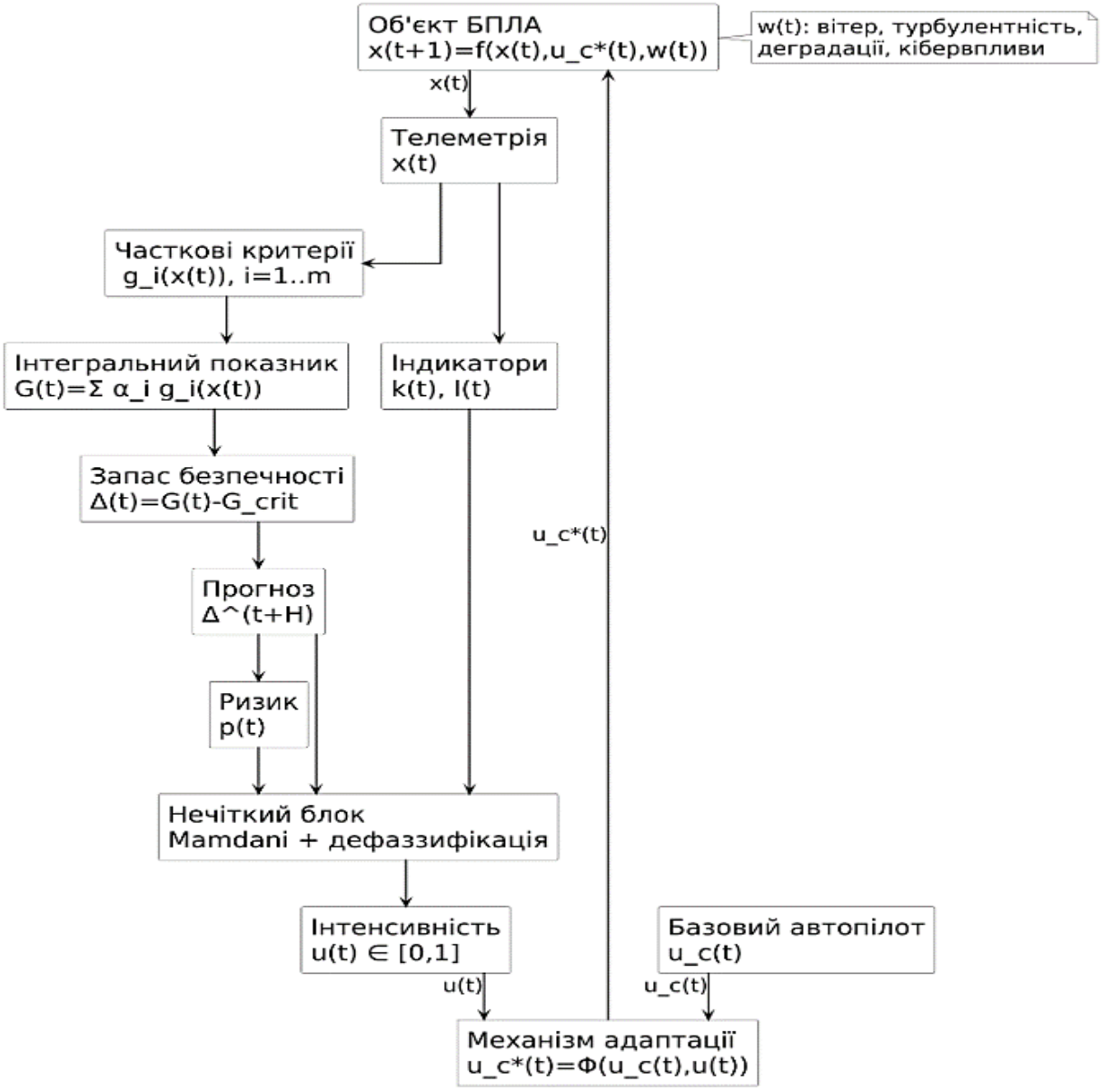


Рис. 1. Архітектура контурів СППР гарантоздатності (метарівень) у системі керування БПЛА

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 1 подано структурну схему інтеграції системи підтримки прийняття рішень гарантоздатності у замкнений контур керування БПЛА. Нижній рівень становить об’єкт керування з базовим автопілотом, який формує керуючі сигнали для стабілізації польоту. На основі телеметрії обчислюються часткові критерії якості функціонування, що агрегуються в інтегральний показник гарантоздатності. Порівняння цього показника з критичною межею дозволяє визначити запас безпечності, після чого формується його прогноз та оцінюється ризик переходу до небезпечної області. Разом із додатковими індикаторами інтенсивності збурень і ресурсних обмежень ці величини надходять до нечіткого

блоку прийняття рішень. У результаті визначається інтенсивність адаптивного втручання, яка використовується для модифікації режиму роботи автопілота. Таким чином, СППР функціонує як метарівень керування: вона не замінює базовий контур стабілізації, а впливає на нього через регулювання інтенсивності адаптації, забезпечуючи підтримання безпечного режиму функціонування в умовах збурень і деградацій.

Представлена архітектура демонструє, що прийняття рішення про рівень адаптивного втручання базується на узагальненій оцінці поточного стану системи [10-11]. Оскільки показники функціонування мають різну фізичну природу та масштаб (динамічні параметри, енергетичні ресурси, ризик, відхилення від допустимих меж), їх безпосереднє використання в алгоритмі прийняття рішень є ускладненим. Тому доцільним є введення інтегрального показника гарантоздатності, який агрегує часткові критерії в єдину скалярну характеристику стану системи.

Інтегральний показник гарантоздатності

Оскільки гарантоздатність визначається сукупністю різнорідних факторів, доцільно перейти від багатовимірного опису стану до скалярного інтегрального показника, що узагальнює ключові критерії якості та безпечності функціонування [10]. Гарантоздатність формалізується через інтегральний функціонал:

$$G(t) = \sum_{i=1}^{m} \alpha_i g_i(x(t)), \quad (3)$$

де $G(t)$ – інтегральний показник гарантоздатності у момент t (нормована безрозмірна величина);

m – кількість часткових критеріїв;

$g_i \in [0,1]$ – нормовані часткові критерії, обчислені з телеметрії або оцінок стану (наприклад: точність відстеження траєкторії, стійкість, рівень вібрацій, затримки зв'язку, енергоспоживання);

$\alpha_i \geq 0$ – вагові коефіцієнти важливості критеріїв, які задовольняють умову $\sum_{i=1}^{m} \alpha_i = 1$. Інтерпретаційно, $G(t)$ є зваженою згорткою критеріїв: значення, ближчі до 1, відповідають кращому функціонуванню за прийнятою шкалою, а значення, що зменшуються, сигналізують про деградацію гарантоздатності та потребу в адаптації.

Для прийняття рішень важливо не лише поточне значення інтегрального показника, а й те, наскільки система "віддалена" від критичної межі безпечної експлуатації. Тому вводимо запас безпечності як різницю між поточною оцінкою та порогом. Критичне значення G_{crit} визначає межу безпечної експлуатації. Запас безпечності:

$$\Delta(t) = G(t) - G_{crit}, \quad (4)$$

де G_{crit} – критичне порогове значення інтегрального показника, що задає межу допустимого функціонування (визначається нормативами, вимогами місії або експериментально);

$\Delta(t)$ – запас безпечності (margin до критичної межі).

За змістом $\Delta(t) > 0$ означає роботу в допустимій області, $\Delta(t) = 0$ – граничний стан, $\Delta(t) < 0$ – вихід у небезпечну область і порушення гарантоздатності [12; 14]. Запас безпечності є основною величиною для прийняття рішень, оскільки кількісно характеризує відстань інтегрального показника до критичної межі.

Для врахування динаміки наближення до критичної межі введемо індикатор тренду запасу безпечності: $v_\Delta(t) = \Delta(t) - \Delta(t-1)$, де $v_\Delta(t)$ – приріст запасу безпечності за один крок дискретизації. Значення $v_\Delta(t) < 0$ відповідає зменшенню запасу (наближенню до небезпечної області), тоді як $v_\Delta(t) > 0$ – його відновленню. Для використання у нечіткій моделі індикатор нормується до інтервалу [0;1]: $\bar{v}_\Delta(t) = \frac{v_{max} - v_\Delta(t)}{v_{max} - v_{min}}$, де

v_{max}, v_{min} визначаються з експериментальних даних або задаються емпірично. Нормування виконується так, що більші значення $\bar{v}_\Delta(t)$ відповідають більш негативним значенням $v_\Delta(t)$ (швидшому зменшенню запасу безпечності), тобто шкала інвертується відносно знаку приросту.

Прогнозна модель запасу безпечності (Модель 1)

Щоб забезпечити випереджувальний характер реагування, СППР має оцінювати тенденцію зміни запасу безпечності на горизонті прогнозування [8; 11]. Для цього використано просту дискретну прогнозну модель, що враховує попередні прирости запасу:

$$\hat{\Delta}(t+H) = \Delta(t) + \sum_{k=1}^{H} \beta_k \, v_\Delta(t-k), \quad (5)$$

де $\hat{\Delta}(t+H)$ – прогнозоване значення запасу безпечності через H кроків, H – горизонт прогнозування;

β_k – вагові коефіцієнти, що визначають внесок попередніх тенденцій;

$v_\Delta(\tau) = \Delta(\tau) - \Delta(\tau-1)$ – дискретний приріст запасу безпечності (у (5) використано $v_\Delta(t-k)$).

Для обчислення (5) використовується буфер історії довжиною щонайменше $H+1$ значень Δ. У разі нестачі даних на початку польоту застосовується ініціалізація нульовими приростами або ковзне вікно меншої довжини.

Якщо $v_\Delta(t-k) < 0$, тобто запас безпечності зменшується (гарантоздатність погіршується), прогнозований запас буде меншим за поточний. Навіть якщо $\Delta(t) > 0$, але $\hat{\Delta}(t+H) \approx 0$, СППР повинна ініціювати адаптивне втручання. Крім того, $v_\Delta(t-k) = \Delta(t-k) - \Delta(t-k-1)$. Модель (5) використовується як "ранній індикатор": якщо прогнозований запас наближається до нуля або стає від'ємним, СППР повинна ініціювати адаптивне втручання до настання критичного режиму.

Ймовірнісна модель ризику (Модель 2)

Оскільки збурення та деградації мають стохастичний характер, доцільно перейти від детермінованої оцінки прогнозу до ймовірнісної оцінки ризику порушення гарантоздатності. Ризик інтерпретується як імовірність переходу в небезпечну область у межах горизонту прогнозування. Ризик переходу до небезпечної області формалізується як:

$$p(t) = P(\Delta(t+H) < 0 \mid \hat{\Delta}(t+H), k(t), \ell(t)), \quad (6)$$

де $p(t) \in [0,1]$ – оцінка ризику втрати гарантоздатності, подія $\Delta(t+H) < 0$ означає прогнозований вихід у небезпечну область. У такому формулюванні ризик пов'язує прогноз із прийняттям рішень і дозволяє оцінювати не лише "наскільки близько до межі", а й "наскільки ймовірно" перетнути межу [20; 22].

Для практичного обчислення ризику використано логістичне відображення прогнозованого запасу у ймовірнісну шкалу. Це забезпечує гладкий перехід між зонами "низького" та "високого" ризику. У практичній реалізації використовується логістична функція:

$$p(t) = \frac{1}{1+e^{-k_p(\theta - \hat{\Delta}(t+H))}}, \quad (7)$$

де $k_p > 0$ – параметр крутості переходу (чим більший k_p, тим різкіший перехід між низьким і високим ризиком);

θ – параметр центру переходу, який визначає значення прогнозованого запасу, за якого ризик наближається до 0,5.

Таким чином, модель (7) переводить прогноз $\hat{\Delta}(t+H)$ у зручну для правил прийняття рішень шкалу ризику $p(t)$.

Нечітка багатокритеріальна модель (Модель 3)

Оскільки рішення має враховувати не один показник, а сукупність факторів, стан прийняття рішень задається компактним вектором індикаторів. Такий опис зменшує розмірність задачі та робить можливим формування рішення на основі експертних правил за умов невизначеності. Стан прийняття рішень:

$$s(t) = \langle \hat{\Delta}\,(t+H), \bar{v}_{\Delta}(t), k(t), \ell(t), p(t) \rangle, \quad (8)$$

де $\hat{\Delta}(t+H)$ – прогноз запасу безпечності;

$p(t)$ – оцінка ризику;

$k(t)$ – індикатор інтенсивності небажаних впливів (наприклад, узагальнена оцінка кібервпливів/аномалій каналів або деградаційних процесів) [20; 22];

$\ell(t)$ – індикатор ресурсних обмежень (наприклад, навантаження обчислювальних ресурсів, запас енергії або обмеження каналу зв'язку) [13; 16; 19; 21], чим більше $\ell(t)$, тим жорсткіші обмеження;

$\bar{v}_{\Delta}(t)$ – нормований індикатор темпу зміни запасу безпечності. У подальшому ці індикатори подаються на нечітку систему правил, яка визначає інтенсивність адаптивного втручання.

Додавання $v_{\Delta}(t)$ дозволяє відрізняти ситуації з однаковим прогнозним запасом $\hat{\Delta}$, але різною динамікою наближення до межі (повільне vs. швидке погіршення), що критично для випереджувального вибору інтенсивності втручання.

На відміну від варіантів, де рішення формується лише за прогнозним запасом та ризиком, введення індикатора $v_{\Delta}(t)$ дозволяє врахувати темп деградації, що підвищує чутливість СППР до швидких переходів у критичну область і узгоджує графіки функцій належності на рис. 2(b) з формальним описом стану прийняття рішень. Введення індикатора $\bar{v}_{\Delta}(t)$ дозволяє врахувати темп зміни запасу безпечності та підвищити чутливість СППР до швидких переходів у критичну область.

Індикатор k визначається як узагальнений "індекс збурень/аномалій", який розраховується з телеметрії та сигналів якості каналу: він може включати нормовані складові помилки відстеження, зростання вібрацій/кутових швидкостей, статистику залишків оцінювача стану [12; 14], а також показники нестабільності зв'язку (затримка, джиттер, втрати пакетів). Компоненти, пов'язані з аномаліями/кібернетичними впливами в каналах та телеметрії, доцільно інтерпретувати через підходи аналізу мережевого трафіку/інцидентів і керування/захисту в кіберфізичних середовищах [13; 16; 19; 21]. Для забезпечення єдиної шкали використовується нормування до [0;1] (наприклад, min–max або через порогову шкалу "норма–попередження–критично"), де більші значення відповідають більш інтенсивним небажаним впливам.

Індикатор ℓ відображає ресурсні обмеження і формується як агрегат від завантаження обчислювальних ресурсів і енергетичного стану (рівень заряду, запас потужності), після чого також нормується до [0;1]. При цьому 0 означає достатні ресурси для роботи в номінальному режимі, а 1 – необхідність обмеження складності алгоритмів/перехід у більш "економний" режим.

Кожен індикатор подається у нечіткий вигляд через функції належності, що відображають лінгвістичні терми (наприклад, "низький/середній/високий запас", "низький/високий ризик"). Активація правил виконується за схемою Мамдані з використанням операторів min–max. Для j-го правила бази знань ступінь його активації визначається як: $\alpha_j = min\left\{\mu_{\Delta}^{(j)}(\hat{\Delta}), \mu_p^{(j)}(p), \mu_v^{(j)}(\bar{v}_{\Delta}), \mu_k^{(j)}(k), \mu_{\ell}^{(j)}(\ell)\right\}$. Агрегація правил (оператор Мамдані) виконується за формулою:

$$\mu_{out}(z) = \max_j(min\left\{\alpha_j, \mu_u^{(j)}(z)\right\}), \quad (9)$$

де $\mu_{\Delta}^{(j)}(\hat{\Delta}), \mu_p^{(j)}(p), \mu_v^{(j)}(\bar{v}_{\Delta}), \mu_k^{(j)}(k), \mu_{\ell}^{(j)}(\ell)$ – функції належності вхідних індикаторів для j -го правила, $\mu_u^{(j)}(z)$ – функція належності вихідного терма ("низьке", "середнє", "високе втручання"), оператор min реалізує кон'юнкцію умов правила та імплікацію Мамдані (об-

різання вихідної функції належності на рівні α_j), а оператор $\max\limits_j$ виконує агрегацію внесків усіх активованих правил у результуючу нечітку множину $\mu_{out}(z)$. Вихідна змінна z інтерпретується як ступінь рекомендованої інтенсивності адаптивного втручання.

Для ілюстрації структури бази знань наведемо типові правила нечіткого виводу, що демонструють використання індикатора темпу зменшення запасу безпечності $\bar{v}_\Delta(t)$:

1. Якщо прогнозований запас безпечності Низький і темп зменшення запасу Високий, то інтенсивність втручання Висока.
2. Якщо прогнозований запас Середній, ризик Високий і темп зменшення запасу Високий, то інтенсивність втручання Висока.
3. Якщо прогнозований запас Високий, ризик Низький і темп зменшення запасу Низький, то інтенсивність втручання Низька.
4. Якщо ресурсні обмеження Високі і ризик Високий, то інтенсивність втручання Середня або Висока залежно від пріоритету безпечності.

Наведені правила відображають компроміс між наближенням до критичної межі, швидкістю деградації стану, рівнем ризику та ресурсними обмеженнями і підтверджують використання індикатора темпу зміни запасу в процедурі прийняття рішення.

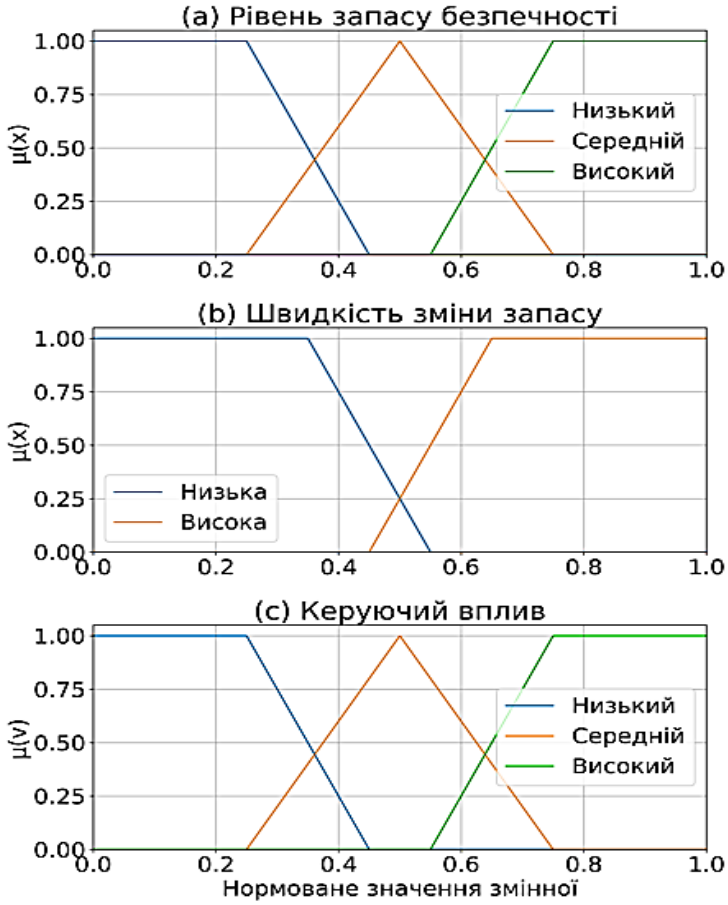


Рис. 2. Функції належності нечіткого регулятора для формування керуючого впливу

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 2 подано графіки функцій належності, що використовуються в нечіткому регуляторі адаптивного керування. Зокрема, у підрисунку (а) наведено функції належності для лінгвістичної змінної «Рівень прогнозованого запасу безпечності», представлені термами Низький, Середній і Високий, які відображають ступінь наближення системи

до критичної межі на горизонті прогнозування. У підрисунку (b) показано функції належності змінної «Темп зміни запасу безпечності», що відповідає нормованому темпу зміни запасу $\bar{v}_{\Delta}(t)$, який отримують з $v_{\Delta}(t) = \Delta(t) - \Delta(t-1)$ шляхом лінійного нормування до [0;1]. Під час нормування шкали $\bar{v}_{\Delta}(t)$ значення, близькі до 1, відповідають більш інтенсивному зменшенню запасу безпечності (швидшому наближенню до критичної межі), тоді як значення, близькі до 0, відповідають менш інтенсивному його зменшенню. Лінгвістичні терми Низький та Високий характеризують відповідно повільне або швидке зменшення запасу безпечності, тобто інтенсивність наближення системи до небезпечної області. У підрисунку (c) наведено функції належності вихідної змінної «Інтенсивність адаптивного втручання», представлені термами Низький, Середній і Високий, які визначають рівень модифікації режиму роботи автопілота. Використання трикутних і трапецієподібних функцій забезпечує плавне перекриття термів та безперервність переходів між лінгвістичними значеннями, що сприяє стабільності процесу нечіткого виводу та формуванню керуючого сигналу на основі узгодженої оцінки прогнозованого стану системи та темпу його зміни

Для отримання числового значення інтенсивності втручання використано дефазифікацію методом центру ваги, що забезпечує гладкість і відсутність стрибків у керуючих впливах. Дефазифікація:

$$u(t) = \frac{\int z\, \mu_{out}(z) dz}{\int \mu_{out}(z) dz}, \tag{10}$$

де $u(t) \in [0,1]$ – числова оцінка інтенсивності адаптивного втручання;

$\mu_{out}(z)$ – агрегована вихідна функція належності [12, 14, 20].

Отримане $u(t)$ використовується в механізмі Ф(·) для корекції режиму роботи автопілота.

Отримане значення $u(t)$ визначає ступінь модифікації параметрів або режимів роботи базового контуру керування без його повної перебудови. Залежно від величини $u(t)$ може здійснюватися масштабування коефіцієнтів регулятора, обмеження керуючих сигналів або перехід до більш захищеного режиму функціонування. Плавний характер зміни $u(t)$ забезпечує відсутність різких перехідних процесів і зменшує ризик додаткових коливань у системі. Таким чином, дефазифікований коефіцієнт втручання реалізує метарівневу адаптацію керування, узгоджуючи вимоги безпечності, стійкості та ресурсної ефективності.

На рис. 3 подано послідовність дій, що виконуються системою підтримки прийняття рішень на кожному дискретному кроці керування. Процедура починається зі зчитування телеметрії та обчислення інтегральної оцінки гарантоздатності й відповідного запасу безпечності [11]. Далі формується прогноз зміни запасу на заданому горизонті та оцінюється ризик переходу до небезпечної області. Отримані величини разом з індикаторами збурень і ресурсних обмежень об’єднуються у вектор стану прийняття рішень. На основі перевірки граничних умов (прогнозоване зменшення запасу або перевищення порогу ризику) визначається необхідність ініціації захищеного режиму. Після цього виконується нечітке виведення, результатом якого є інтенсивність адаптивного втручання. Сформована інтенсивність використовується для модифікації режиму роботи автопілота, після чого керування подається на об’єкт і алгоритм переходить до наступного кроку. Таким чином, рисунок відображає повний цикл прийняття рішення в СППР та демонструє, як прогноз і ризик впливають на адаптацію режимів керування в реальному часі.

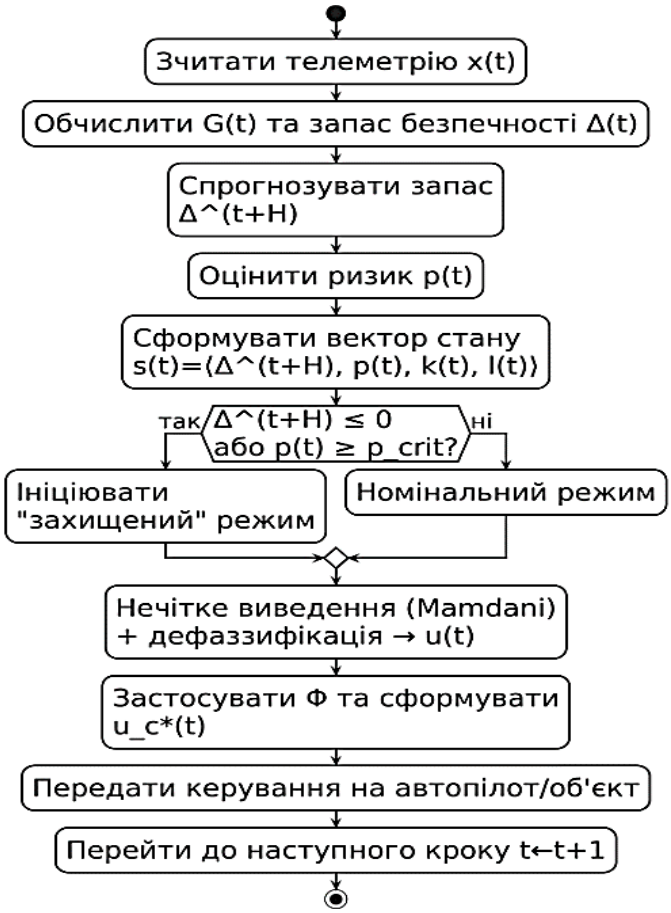


Рис. 3. Блок-схема алгоритму прийняття рішення СППР гарантоздатності (крок t)
Джерело: розроблено авторами.

Однак саме по собі формування інтенсивності втручання потребує узгодження між вимогами безпечності та обмеженнями ресурсів і динаміки системи [14; 20; 22]. Надмірно агресивна адаптація може призвести до зростання енерговитрат або погіршення якості керування, тоді як недостатня реакція підвищує ризик переходу до небезпечного режиму. Тому вибір параметра адаптації доцільно формалізувати через узагальнений критерій раціональності, що відображає компроміс між безпечністю та "вартістю" втручання.

Функціонал раціональності (Модель 4)

Щоб узгодити безпечність і "ціну" адаптації, доцільно оцінювати рішення через узагальнений функціонал, який відображає компроміс між ризиком небезпечного режиму, енерговитратами та плавністю керування [10, 12, 14]:

$$J = \lambda_1 P_{unsafe} + \lambda_2 J_u + \lambda_3 J_{\Delta u}, \quad (11)$$

де P_{unsafe} – узагальнена міра небезпечності (може бути ототожнена з ризиком або ймовірністю виходу за межу);

J_u – міра "вартості" втручання (наприклад, додаткові енерговитрати чи втрати ефективності місії, пов'язані з переходом у більш захищений режим);

$J_{\Delta u}$ – міра зміни інтенсивності втручання в часі (штраф за різкі коливання $u(t)$;

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 > 0$ – ваги критеріїв, що задають пріоритети.

Мінімізація цього функціонала інтерпретує прийняття рішень як компроміс між "бути безпечним" і "не втручатися зайвий раз". Функціонал (11) використовується як інтерпретаційний критерій для налаштування правил і ваг; безпосередньо онлайн-мінімізація не виконується".

Марковська модель прийняття рішень (Модель 5)

Для надання моделі строгого оптимізаційного змісту процес прийняття рішень можна трактувати як марковський процес: стан визначається набором індикаторів, а дія – рівнем інтенсивності втручання [8]. Така інтерпретація дозволяє розглядати нечіткий регулятор як практичну апроксимацію політики оптимального керування.

$$S_t = \{\Delta, p, k, \ell\},\ A_t = u(t), \tag{12}$$

де S_t – стан у момент t, який включає індикатори запасу, ризику, інтенсивності впливів та ресурсних обмежень;

A_t – дія, що задається вибраною інтенсивністю втручання $u(t)$.

Для спрощення запису стан MDP подано в редукованому вигляді; за потреби він розширюється до $s(t) = \langle \hat{\Delta}\ (t+H), \bar{v}_{\Delta}(t), k(t), \ell(t), p(t) \rangle$, що узгоджується з (8).

Оцінку якості вибраної дії задає функція миттєвих втрат, яка штрафує небезпечні стани, підвищений ризик та надмірну інтенсивність втручання. Функція вартості [20, 22]:

$$c(S_t, A_t) = \Delta^{-}(t) + \eta u^2(t) + \beta p(t), \tag{13}$$

де $\Delta^{-}(t) = \max\{0, -\Delta(t)\}$ – "негативна частина" запасу безпечності, яка дорівнює нулю в допустимій області та зростає при порушенні гарантоздатності;

$\eta > 0$ – коефіцієнт штрафу за надмірну інтенсивність втручання;

$\beta > 0$ – коефіцієнт ваги ризику.

Така форма забезпечує прагнення уникати небезпечних режимів і підвищеного ризику, водночас не допускаючи зайвих або різких втручань. Індикатори $k(t)$ та $\ell(t)$ впливають на функцію вартості опосередковано через формування інтенсивності втручання $u(t)$ у межах політики прийняття рішень.

Оптимальна політика визначається як така, що мінімізує очікувану сумарну (дисконтовану) величину втрат у часі. Оптимальна політика:

$$\pi^* = \arg\min_{\pi} E_{\pi}\left[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t c(S_t, A_t)\right], \tag{14}$$

де π^* – оптимальна політика вибору інтенсивності втручання, $\gamma \in (0,1)$ – коефіцієнт дисконтування майбутніх втрат, $E_{\pi}[\cdot]$ – математичне сподівання за траєкторіями системи, індукованими політикою π, з урахуванням стохастичних збурень [8; 12; 14]. У цій інтерпретації нечітка СППР розглядається як практично реалізована апроксимація оптимальної політики без явного розв'язання рівняння Беллмана через обмеження реального часу.

Модель робастності (Модель 6)

Для кількісного порівняння стійкості системи до зовнішніх впливів вводиться узагальнений коефіцієнт робастності, який характеризує, який накопичений додатний запас безпечності забезпечується на одиницю інтенсивності збурень:

$$K_{rob} = \frac{\sum_{t=t_0}^{t_1} max\ (0, \Delta(t))}{\sum_{t=t_0}^{t_1} \|w(t)\|}, \tag{15}$$

де сумування виконується за скінченний інтервал моделювання $[t_0, t_1]$, K_{rob} – коефіцієнт робастності, $\sum_{t=t_0}^{t_1} max\ (0, \Delta(t))$ – сумарний додатний запас безпечності за інтервал спостереження, $\sum_{t=t_0}^{t_1} \|w(t)\|$ – сумарна інтенсивність збурень за той самий інтервал (норма вектора зовнішніх впливів) [12; 20; 22]. Використання додатної частини запасу безпечності дозволяє враховувати лише перебування системи в допустимій області, не "нагороджуючи" модель за від'ємні значення $\Delta(t)$. Чим більший K_{rob}, тим ефективніше

система зберігає запас безпечності за наявності зовнішніх збурень та деградації. У числовому експерименті $w(t)$ нормується до безрозмірної шкали [0;1] як агрегований індекс інтенсивності збурень, що враховує зовнішні аеродинамічні впливи та деградацію тяги.

Формалізація безпечної множини та умова інваріантності

Щоб сформулювати вимогу безпечності у строгому математичному вигляді, визначимо множину допустимих станів, у межах якої гарантоздатність не нижча за критичний рівень [12; 14; 20]. Для строгого визначення області допустимого функціонування введемо безпечну множину станів:

$$\Omega_{safe} = \{x \in \mathbb{R}^n \mid G(x) \geq G_{crit}\}, \quad (16)$$

де $\Omega_{safe} \subset \mathbb{R}^n$ – безпечна множина станів, $G(x)$ – значення інтегрального показника для конкретного стану x. Геометрично це надрівнева множина, яка відокремлює допустимі стани від небезпечних. Множина Ω_{safe} визначає всі стани БПЛА, для яких інтегральний показник гарантоздатності не нижчий за критичний рівень. Геометрично це надрівнева множина функції $G(x)$, що розділяє простір станів на: допустиму область $G(x) \geq G_{crit}$, небезпечну область $G(x) < G_{crit}$.

Оскільки запас безпечності визначено як різницю між поточною оцінкою та критичним порогом, умова належності до безпечної множини еквівалентно переписується через знак запасу:

$$x(t) \in \Omega_{safe} \Leftrightarrow \Delta(t) \geq 0, \quad (17)$$

Цей запис зручний для алгоритмічної перевірки: СППР контролює не лише сам показник, а саме знак і динаміку запасу безпечності.

Інваріантність безпечної множини означає, що якщо система перебуває в допустимій області, то після наступного кроку вона не повинна її покинути. Множина Ω_{safe} називається інваріантною, якщо $x(t) \in \Omega_{safe} \Rightarrow x(t+1) \in \Omega_{safe}$. З урахуванням (4) це еквівалентно умові:

$$\Delta(t) \geq 0 \Rightarrow \Delta(t+1) \geq 0, \quad (18)$$

Таким чином, задача СППР зводиться до вибору інтенсивності втручання так, щоб зберігати невід'ємність запасу на наступному кроці, попри збурення та деградацію.

Рис. 4. Геометрична інтерпретація множини безпечних станів Ω_{safe} та запасу безпечності Δ

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 4 подано концептуальну інтерпретацію множини допустимих станів системи Ω_{safe}, яка визначається умовою $G(x) \geq G_{crit}$. Межа $G = G_{crit}$ відокремлює безпечну область від небезпечної, у якій порушується гарантоздатність системи. Траєкторія стану $x(t)$ розташована всередині області Ω_{safe}, що ілюструє виконання умови інваріантності.

Запас безпечності $\Delta(t)$ інтерпретується як відстань від поточного стану до критичної межі. Умова $\Delta(t) \geq 0$ забезпечує збереження безпечного режиму функціонування, тоді як перетин межі відповідає переходу до небезпечної області.

Геометрична інтерпретація дозволяє інтуїтивно пояснити умову інваріантності, проте для побудови алгоритму керування необхідно отримати аналітичний зв'язок між зміною стану системи та еволюцією інтегрального показника гарантоздатності. Зокрема, важливо формалізувати, як малий приріст стану за один дискретний крок впливає на значення функціонала $G(x)$. Це дає змогу перейти від геометричної інтерпретації до диференціально-аналітичної оцінки зміни запасу безпечності.

Редукована модель динаміки гарантоздатності

Для аналітичного зв'язку між динамікою об'єкта та інтегральним показником гарантоздатності використовується наближення першого порядку, яке показує, як малі зміни стану за один крок впливають на значення інтегральної оцінки [12; 14; 20]. Оскільки $G(x)$ є функцією стану, а стан змінюється за (1), приріст інтегрального показника можна наближено оцінити через перший член розкладу Тейлора:

$$G(t+1) \approx G(t) + \nabla G(x(t))^{\mathsf{T}} \, (x(t+1) - x(t)), \tag{19}$$

де $\nabla G(x(t))$ – градієнт функції гарантоздатності за станом (вектор чутливості показника до змін компонент стану), а символ $(\cdot)^{\mathsf{T}}$ означає транспонування. Підставляючи (1), отримаємо: $G(t+1) \approx G(t) + \nabla G(x(t))^{\mathsf{T}} \, (f\big(x(t), u_c^*(t), w(t)\big) - x(t))$. З урахуванням механізму адаптивного втручання $u_c^*(t) = \Phi(u_c(t), u(t))$, отримуємо:

$$G(t+1) \approx G(t) + \nabla G(x(t))^{\mathsf{T}} \, (f(x(t), \Phi(u_c(t), u(t)), w(t)) - x(t)), \tag{20}$$

Цей запис робить явним канал впливу СППР: інтенсивність втручання змінює керування, а керування – траєкторію станів і, відповідно, еволюцію інтегральної оцінки гарантоздатності [20-22]. Рівняння показує: як адаптивний коефіцієнт $u(t)$ впливає на еволюцію гарантоздатності, а також, що СППР впливає не безпосередньо на стан, а через зміну структури керування.

Аналогічний зв'язок зручно переписати через запас безпечності, оскільки $\Delta(t) = G(t) - G_{crit}$, то:

$$\Delta(t+1) \approx \Delta(t) + \nabla G(x(t))^{\mathsf{T}} \, (f(x(t), \Phi(u_c(t), u(t)), w(t)) - x(t)), \tag{21}$$

Це є редукована модель динаміки гарантоздатності. Редукована модель еволюції запасу безпечності дозволяє інтерпретувати ціль СППР як підтримання невід'ємного запасу на кожному кроці, навіть за наявності стохастичних збурень.

Теоретичне твердження про стохастичну інваріантність

Якщо існує стратегія керування $u(t)$, для якої $E[\Delta(t+1) \mid x(t)] \geq 0 \; \forall x(t) \in \Omega_{safe}$, то це означає відсутність негативного середнього дрейфу запасу безпечності та є практичним критерієм утримання траєкторії поблизу Ω_{safe}. Водночас така умова не задає строгих імовірнісних гарантій типу $P(\Delta(t+1) \geq 0 \mid x(t) \geq \Omega_{safe} = 1$ або $P(\Delta(t+1) \geq 0 \geq 1 - \varepsilon$, оскільки для цього необхідні додаткові припущення щодо розподілу та обмеженості збурень $w(t)$, похибок вимірювання та можливих деградацій або атак.

Таким чином, зазначена умова інтерпретується як критерій відсутності систематичного зниження запасу безпечності, але не як абсолютна гарантія перебування системи в допустимій області на кожному кроці. СППР, що формує інтенсивність втручання $u(t)$ за нечіткою моделлю (8–10), реалізує практичну стратегію зменшення частоти та глибини порушень допустимої області і може інтерпретуватися як апроксимація політики мінімізації ризику втрати гарантоздатності.

Для прикладної верифікації цієї властивості у числовому експерименті додатково аналізуються частка часу перебування в небезпечній області та мінімальне значення $\Delta(t)$ на траєкторії.

Числовий експеримент

Для перевірки гарантоздатності запропонованої моделі прийняття рішень у системі підтримки гарантоздатності було проведено імітаційне моделювання квадрокоптера в умовах комбінованого негативного впливу. Метою експерименту було оцінити здатність СППР підтримувати запас безпечності, знижувати ризик втрати гарантоздатності та підвищувати робастність системи порівняно з базовим автопілотом.

Моделювання виконувалося в дискретному часі з урахуванням зовнішніх збурень, параметричних невизначеностей та обмежень виконавчих органів, що дозволило відтворити реалістичні умови функціонування системи [17-18]. Порівняльний аналіз динаміки запасу безпечності, інтегрального показника гарантоздатності та рівня ризику дав змогу кількісно оцінити ефективність запропонованого механізму адаптивного втручання.

Моделювання виконано за таких параметрів: горизонт прогнозування $H = 10$ кроків, крок дискретизації $T_s = 0{,}05$ с, сценарій збурення: імпульсне зовнішнє аеродинамічне збурення та деградація тяги одного двигуна на 20%.

Вибір горизонту прогнозування H забезпечує випереджувальну оцінку зміни запасу безпечності, тоді як крок дискретизації відповідає типовим параметрам цифрових контурів керування БПЛА. Деградація двигуна моделює часткову відмову виконавчого органу, що є типовим критичним сценарієм. Експеримент проведено для двох випадків:

1. Базовий автопілот без СППР;
2. Автопілот з інтегрованою СППР гарантоздатності.

Ключовим показником аналізу є запас безпечності $\Delta(t) = G(t) - G_{crit}$, який визначає відстань інтегрального показника гарантоздатності до критичної межі. У випадку базового автопілота спостерігається монотонне зменшення запасу безпечності під дією збурень. Через 4,8 с після виникнення деградації двигуна виконується умова $\Delta(t) \to 0$, що означає досягнення граничного стану та наближення системи до небезпечної області.

У випадку використання СППР адаптивний коефіцієнт втручання $u(t)$ коригує параметри автопілота таким чином, що $\Delta(t) > 0$ зберігається протягом усього інтервалу моделювання. Це узгоджується з критерієм стохастичної інваріантності в сенсі відсутності негативного дрейфу запасу безпечності та емпірично демонструє тенденцію до збереження траєкторії в області Ω_{safe} у розглянутому сценарії моделювання. Отже, введення метарівня керування дозволяє підтримувати позитивний запас безпечності навіть за наявності деградаційних процесів. На основі прогнозної моделі визначається ймовірність переходу до небезпечної області: $p(t) = \frac{1}{1+e^{-k_p(\theta-\hat{\Delta}(t+H))}}$. Оцінка $p(t)$ використовується як індикатор наближення системи до критичної межі та визначає необхідну інтенсивність адаптивного втручання на наступному кроці керування [11]. Зі зменшенням прогнозованого запасу $\hat{\Delta}\,(t+H)$ значення ймовірності зростає нелінійно, що забезпечує випереджальну реакцію СППР ще до фактичного порушення умови інваріантності. Таким чином, поєднання прогнозної оцінки та логістичної моделі ризику формує механізм превентивного керування, спрямований на збереження гарантоздатності в умовах невизначеності та збурень.

Максимальні значення ризику в експерименті становили: без СППР: $p_{\max} = 0{,}81$, із СППР: $p_{\max} = 0{,}32$. Таким чином, використання СППР забезпечує зниження пікового ризику приблизно на 60%. Це означає, що система не лише підтримує позитивний запас безпечності, а й істотно зменшує ймовірність його втрати в майбутньому горизонті прогнозування.

На графіку (рис. 5) відображено зміну запасу безпечності $\Delta(t)$ у часі для двох режимів керування: базового автопілота та автопілота з системою підтримки прийняття рішень (СППР). Базовий автопілот демонструє монотонне зменшення запасу безпечності

з переходом у критичну область ($\Delta < 0$) після 5 с, що свідчить про втрату гарантоздатності. Автопілот із СППР підтримує $\Delta(t)$ у додатній області протягом усього інтервалу моделювання, демонструючи адаптивну стабілізацію системи та уникнення перетину критичної межі ($\Delta = 0$).

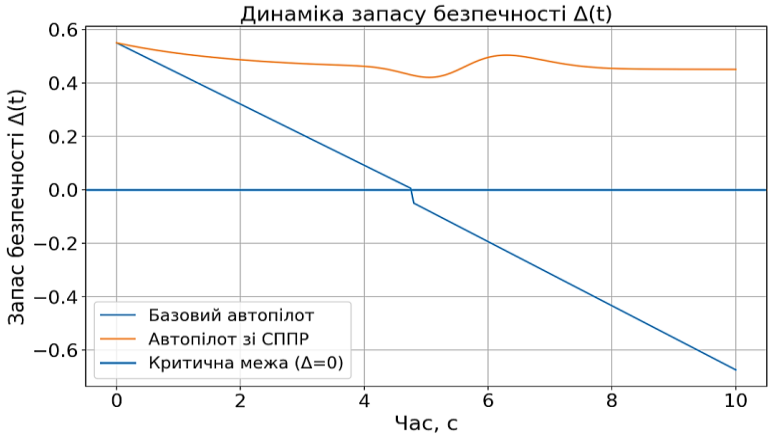


Рис. 5. Динаміка запасу безпечності $\Delta(t)$ для базового автопілота та автопілота із СППР
Джерело: розроблено авторами.

Графік на рис. 6 ілюструє часову зміну інтегральної оцінки ризику $p(t)$ у двох режимах функціонування системи керування. Для базового автопілота спостерігається стрімке зростання ризику в інтервалі 4–6 с з досягненням пікового значення $p_{\max}$ = 0.81, що свідчить про перехід системи до зони високої ймовірності втрати керованості або порушення умов безпечного функціонування. Після піку ризик зменшується, однак залишається на підвищеному рівні порівняно з початковим станом. У випадку автопілота із СППР крива ризику має згладжений характер, а максимальне значення становить $p_{\max}$ = 0.32, що більш ніж у 2,5 раза менше порівняно з базовим автопілотом і свідчить про ефективне обмеження розвитку критичного стану на ранній стадії. Таким чином, впровадження СППР забезпечує не лише зменшення пікового значення ризику, а й зниження швидкості його наростання, що підвищує загальну стійкість та гарантоздатність системи управління.

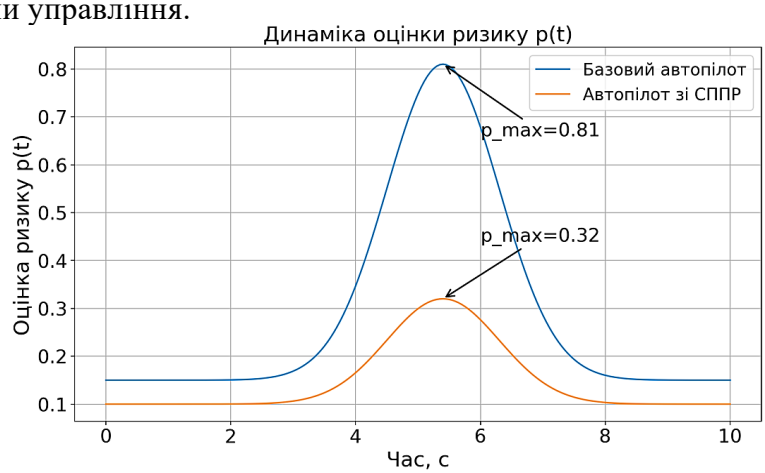


Рис. 6. Динаміка оцінки ризику $p(t)$ для базового автопілота та автопілота з СППР
Джерело: розроблено авторами.

Для кількісної оцінки здатності системи протистояти збуренням використано коефіцієнт робастності ($K_{rob} = \frac{\sum_{t=t_0}^{t_1} max\,(0,\Delta(t))}{\sum_{t=t_0}^{t_1} \|w(t)\|}$), отримані значення: $K_{rob}^{base} = 1{,}42$, $K_{rob}^{adaptive} = 2{,}37$. Зростання коефіцієнта робастності на 67 % означає, що адаптивна модель ефективніше компенсує вплив зовнішніх збурень та часткових відмов, забезпечуючи більший

запас безпечності на одиницю збурення [18]. Таким чином, показник K_{rob} характеризує співвідношення накопиченого позитивного запасу безпечності до сумарної інтенсивності збурень за період моделювання та відображає здатність системи компенсувати їх вплив. Порівняння K_{rob}^{base} і $K_{rob}^{adaptive}$ показує, що адаптивна модель формує більший інтегральний запас безпечності за однакових умов збурення. Це підтверджує підвищення стійкості та ефективності СППР у забезпеченні гарантоздатності.

Запропонована модель принципово відрізняється від класичних підходів fault-tolerant control (FTC), у яких адаптація здійснюється безпосередньо на рівні закону керування шляхом компенсації відмов або переналаштування параметрів регулятора. На відміну від таких схем, розроблена система функціонує на метарівні керування, не замінюючи базовий автопілот, а впливаючи на його структуру та параметри через коефіцієнт адаптивного втручання, що визначає інтенсивність модифікації режиму роботи [11]. Такий підхід дозволяє відокремити контур стабілізації від контуру оцінювання гарантоздатності та забезпечити більш гнучке керування в умовах невизначеності.

Модель інтегрує прогноз запасу безпечності на ковзному горизонті та ймовірнісну оцінку ризику переходу до небезпечної області, що забезпечує випереджувальний характер прийняття рішень. На основі цих величин формується багатокритеріальний вектор стану, який обробляється нечіткою системою правил, що дозволяє враховувати суперечливі фактори – ризик, ресурсні обмеження, інтенсивність збурень та динамічні характеристики об’єкта. Додатково модель має інтерпретацію у вигляді марковського процесу прийняття рішень, що надає їй строгого оптимізаційного змісту та дозволяє трактувати нечіткий регулятор як апроксимацію оптимальної політики мінімізації очікуваних втрат.

Важливою особливістю є формалізація безпечної множини станів через інтегральний показник гарантоздатності та встановлення умови її стохастичної інваріантності, що переводить задачу підтримки гарантоздатності з евристичної площини у строгий математичний контекст. Крім того, введено редуковану модель еволюції гарантоздатності, яка пов’язує нелінійну динаміку об’єкта з інтегральною оцінкою якості функціонування та дозволяє аналітично досліджувати вплив адаптивного втручання на зміну запасу безпечності.

Таким чином, уперше отримано інтегровану математичну модель прийняття рішень у системі підтримки гарантоздатності управління БПЛА, яка поєднує прогнозування, ризик-орієнтовану оцінку, багатокритеріальну нечітку логіку та адаптивне метакерування в єдину формалізовану структуру, що має як теоретичне, так і прикладне обґрунтування.

Отримані результати підтверджують доцільність переходу від локальних порогових механізмів і суто компенсаційних схем відмовостійкого керування до формалізованої моделі прийняття рішень у системі підтримки гарантоздатності, що працює на метарівні [17-18]. Запропонований підхід не замінює базовий автопілот і не втручається безпосередньо в низькорівневий закон стабілізації, а керує інтенсивністю адаптивної модифікації режиму функціонування [11]. Це дає змогу відокремити контур стабілізації від контуру оцінювання гарантоздатності, уникати різких перемикань і зменшувати ризик коливань керуючих впливів.

Ключовою перевагою моделі є введення інтегральної оцінки гарантоздатності та запасу безпечності як узагальненого індикатора наближення до критичної межі. На відміну від підходів, орієнтованих на окремі параметри або одиничні симптоми відмов, такий індикатор забезпечує узгоджене трактування критичності в багатовимірному просторі станів і прямо пов’язує рішення системи підтримки з межею допустимого функціонування. Формалізація безпечної області та умови її збереження підвищує строгість підходу і переводить задачу підтримки гарантоздатності з евристичної площини у керовану й відтворювану процедуру.

Суттєвою відмінністю від класичних схем є інтеграція прогнозної інформації у прийняття рішень. Це забезпечує випереджувальний характер реагування та зменшує ймовірність запізнілих втручань. Перехід від прогнозних оцінок до ризик-орієнтованої інтерпретації робить модель придатною для роботи в умовах стохастичних збурень і неповноти даних. Нечітка багатокритеріальна процедура дозволяє узгоджувати суперечливі фактори – безпечність, ресурсні обмеження, інтенсивність збурень і динамічні характеристики об'єкта – та формувати плавні керуючі дії без «жорстких» порогів.

Імітаційний експеримент у сценарії зовнішнього збурення та часткової деградації двигуна показав, що без системи підтримки запас безпечності швидко зменшується до граничного рівня, тоді як із системою підтримки він зберігається в допустимій області протягом усього інтервалу моделювання. Одночасно суттєво знижується пікова оцінка ризику та підвищується робастність до збурень, що узгоджується з ідеєю метарівневої адаптації та випереджувального прийняття рішень.

Разом з тим практичне впровадження підходу потребує калібрування параметрів моделі, вагових коефіцієнтів та налаштувань нечітких правил для конкретного типу БПЛА і умов експлуатації, а також деталізації структури збурень із розділенням фізичних відмов, деградацій і кібернетичних впливів для підвищення інтерпретованості прийнятих рішень.

Висновки. У статті розроблено формалізовану модель прийняття рішень у системі підтримки гарантоздатності управління безпілотних літальних апаратів, орієнтовану на роботу в умовах збурень, деградаційних процесів, ресурсних обмежень і потенційних кібернетичних впливів. Запропоновано узагальнений показник оцінювання гарантоздатності та індикатор наближення до критичної межі, що дає змогу перейти від багатовимірного опису стану до керованої скалярної оцінки й формалізувати межу безпечної експлуатації. Запропоновано випереджувальну логіку реагування на основі прогнозних індикаторів і ризик-орієнтованої оцінки, а також багатокритеріальне формування інтенсивності адаптивного втручання на основі нечіткої логіки, що забезпечує плавність керуючих дій і зменшує ймовірність надмірних або запізнілих втручань.

Результати імітаційного моделювання підтвердили, що використання системи підтримки дозволяє утримувати систему в допустимій області функціонування за комбінованого негативного впливу, знижує ризик втрати гарантоздатності та підвищує робастність до збурень порівняно з базовим режимом керування. Це підтверджує ефективність метарівневого підходу, у якому рішення формується не шляхом прямої заміни закону керування, а через адаптивну зміну режиму функціонування автопілота.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на автоматизоване налаштування параметрів і правил моделі за експериментальними даними, розширення складу індикаторів за рахунок кібернетичних ознак і телеметрії каналів зв'язку, а також на валідацію підходу в апаратно-програмних експериментах і стендових режимах, наближених до реальних умов польоту, з оцінюванням стійкості та якості виконання місії під час адаптивних втручань.

Список використаних джерел

1. Thanaraj, T., Low, K., & Ng, B. F. (2023). Actuator fault detection and isolation on multi-rotor UAV using extreme learning neuro-fuzzy systems. *ISA Transactions, 138,* 1–12. https://doi.org/10.1016/j.isatra.2023.02.026.

2. Li, C., Zhao, W., Zhao, L., et al. (2024). Application of fuzzy logic control theory combined with target tracking algorithm in unmanned aerial vehicle target tracking. *Scientific Reports, 14*, Article 18506. https://doi.org/10.1038/s41598-024-58140-5.

3. Assefa, D., Gedefaw, E., Abdissa, C., & Negash, L. (2025). Adaptive neuro-fuzzy inference system-based sliding mode control in the presence of external disturbances and parameter variation for quadcopter UAV. *Engineering Reports, 7*, e70417. https://doi.org/10.1002/eng2.70417.

4. Giral, F., Gómez, I., Vinuesa, R., & Le Clainche, S. (2024). Transformer-based fault-tolerant control for fixed-wing UAVs using knowledge distillation and in-context adaptation. *arXiv.* https://arxiv.org/abs/2411.02975.

5. Alsaade, F., Al-Zahrani, M., & Alsaadi, F. E. (2025). Ensuring UAV safety: A deep learning-based fault-tolerant approach with control barrier functions. *Chaos, Solitons & Fractals, 200*, 117039. https://doi.org/10.1016/j.chaos.2025.117039.

6. Gao, F. (2025). A novel unmanned aerial vehicles task allocation approach based on the intuitionistic fuzzy multi-criteria bilateral matching-based decision-making method. *Engineering Applications of Artificial Intelligence, 162*, 112669. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.112669.

7. Arapoglou, F., Zacharia, P., & Papoutsidakis, M. (2025). Intelligent counter-UAV threat detection using hierarchical fuzzy decision-making and sensor fusion. *Sensors, 25*(19), 6091. https://doi.org/10.3390/s25196091.

8. Kostiuk, Y., Skladannyi, P., Sokolov, V., & Vorokhob, M. (2025). Models and technologies of cognitive agents for decision-making with integration of artificial intelligence. In *Proceedings of the Modern Data Science Technologies Doctoral Consortium (MoDaST 2025)* (Vol. 4005, pp. 82–96). CEUR-WS.

9. Boubakir, A., Souanef, T., Labiod, S., & Whidborne, J. F. (2024). A robust adaptive PID-like controller for quadrotor unmanned aerial vehicle systems. *Aerospace, 11*(12), 980. https://doi.org/10.3390/aerospace11120980.

10. Safa, N. (2025). A survey of decentralized fault-tolerant control systems. *Academic Journal of Electrical and Computer Engineering, 1*, 51–60. https://doi.org/10.31272/ajece.25.

11. Kostiuk, Y., Skladannyi, P., Sokolov, V., & Rzaieva, S. (2025). Intelligent system for simulation modeling and research of information objects. In *Proceedings of the 1st Workshop Software Engineering and Semantic Technologies (SEST 2025)* (Vol. 4053, pp. 237–251). CEUR-WS.

12. Imran, I. H., Alyazidi, N. M., Eltayeb, A., & Ahmed, G. (2024). Robust adaptive fault-tolerant control of quadrotor unmanned aerial vehicles. *Mathematics, 12*(11), 1767. https://doi.org/10.3390/math12111767.

13. Kostiuk, Y., Skladannyi, P., Sokolov, V., Rzaieva, S., & Khorolska, K. (2025). Machine learning methods for detecting intrusions based on network traffic analysis. In *Proceedings of the Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems II (CPITS-II 2025)* (Vol. 4145, pp. 72–94). CEUR-WS.

14. Wang, W., Chen, Y., Ren, Z., & Liu, H. (2025). Two-step robust fault-tolerant controller design based on nonlinear extended state observer (NESO) for unmanned aerial vehicles (UAVs) with actuator faults and disturbances. *Drones, 9*(3), 183. https://doi.org/10.3390/drones9030183.

15. Komiyama, S., Uchiyama, K., & Masuda, K. (2025). Combined robust control for quadrotor UAV using model predictive control and super-twisting algorithm. *Drones, 9*(8), 576. https://doi.org/10.3390/drones9080576.

16. Костюк, Ю., Складанний, П., Рзаєва, С., Самойленко, Ю., & Коршун, Н. (2025). Інтелектуальні системи керування та захисту в кіберфізичних і хмарних середовищах Smart Grid. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка, 2*(30), 125–156. https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.30.956.

17. Majid, A. R. A., & Aouaichia, A. (2025). Intelligent active disturbance rejection controller based on adaptive neuro fuzzy inference system for the quadrotor system. *Discover Robotics, 1*, 8. https://doi.org/10.1007/s44430-025-00009-x.

18. Yang, H., Qu, Q., Li, W., Chen, X., & Xie, M. (2025). Robust tracking of quadrotor unmanned aerial vehicles based on a linear active disturbance rejection framework. *IFAC-PapersOnLine, 59*, 495–500. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2025.11.682.

19. Rzaeva, S., Skladannyi, P., Kostiuk, Y., Abramov, V., & Kravchenko, V. (2025). Adaptive information security management in cloud-oriented intelligent transportation systems. *Ukrainian Scientific Journal of Information Security, 31*(1), 23–36. https://doi.org/10.18372/2225-5036.31.20634.

20. Hu, X., Wang, B., Shen, Y., Fu, Y., & Li, N. (2023). Disturbance observer-enhanced adaptive fault-tolerant control of a quadrotor UAV against actuator faults and disturbances. *Drones, 7*(8), 541. https://doi.org/10.3390/drones7080541.

21. Skladannyi, P., Kostiuk, Y., Sokolov, V., & Khorolska, K. (2026). Network traffic analysis and management. In A. L. Agbotiname et al. (Eds.), *Handbook of cybersecurity challenges and solutions for emerging technologies* (pp. 148–172). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003640790-9.

22. Madebo, M., Abdissa, C., Negash, L., & Negash, D. (2024). Robust tracking control for quadrotor UAV with external disturbances and uncertainties using neural network-based MRAC. *IEEE Access*. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3374894.

References

1. Thanaraj, T., Low, K., & Ng, B. F. (2023). Actuator fault detection and isolation on multi-rotor UAV using extreme learning neuro-fuzzy systems. ISA Transactions, 138, 1–12. https://doi.org/10.1016/j.isatra.2023.02.026.

2. Li, C., Zhao, W., Zhao, L., et al. (2024). Application of fuzzy logic control theory combined with target tracking algorithm in unmanned aerial vehicle target tracking. Scientific Reports, 14, Article 18506. https://doi.org/10.1038/s41598-024-58140-5.

3. Assefa, D., Gedefaw, E., Abdissa, C., & Negash, L. (2025). Adaptive neuro-fuzzy inference system-based sliding mode control in the presence of external disturbances and parameter variation for quadcopter UAV. Engineering Reports, 7, e70417. https://doi.org/10.1002/eng2.70417.

4. Giral, F., Gómez, I., Vinuesa, R., & Le Clainche, S. (2024). Transformer-based fault-tolerant control for fixed-wing UAVs using knowledge distillation and in-context adaptation. arXiv. https://arxiv.org/abs/2411.02975.

5. Alsaade, F., Al-Zahrani, M., & Alsaadi, F. E. (2025). Ensuring UAV safety: A deep learning-based fault-tolerant approach with control barrier functions. Chaos, Solitons & Fractals, 200, 117039. https://doi.org/10.1016/j.chaos.2025.117039.

6. Gao, F. (2025). A novel unmanned aerial vehicles task allocation approach based on the intuitionistic fuzzy multi-criteria bilateral matching-based decision-making method. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 162, 112669. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.112669.

7. Arapoglou, F., Zacharia, P., & Papoutsidakis, M. (2025). Intelligent counter-UAV threat detection using hierarchical fuzzy decision-making and sensor fusion. Sensors, 25(19), 6091. https://doi.org/10.3390/s25196091.

8. Kostiuk, Y., Skladannyi, P., Sokolov, V., & Vorokhob, M. (2025). Models and technologies of cognitive agents for decision-making with integration of artificial intelligence. In Proceedings of the Modern Data Science Technologies Doctoral Consortium (MoDaST 2025) (Vol. 4005, pp. 82–96). CEUR-WS.

9. Boubakir, A., Souanef, T., Labiod, S., & Whidborne, J. F. (2024). A robust adaptive PID-like controller for quadrotor unmanned aerial vehicle systems. Aerospace, 11(12), 980. https://doi.org/10.3390/aerospace11120980.

10. Safa, N. (2025). A survey of decentralized fault-tolerant control systems. Academic Journal of Electrical and Computer Engineering, 1, 51–60. https://doi.org/10.31272/ajece.25.

11. Kostiuk, Y., Skladannyi, P., Sokolov, V., & Rzaieva, S. (2025). Intelligent system for simulation modeling and research of information objects. In Proceedings of the 1st Workshop Software Engineering and Semantic Technologies (SEST 2025) (Vol. 4053, pp. 237–251). CEUR-WS.

12. Imran, I. H., Alyazidi, N. M., Eltayeb, A., & Ahmed, G. (2024). Robust adaptive fault-tolerant control of quadrotor unmanned aerial vehicles. Mathematics, 12(11), 1767. https://doi.org/10.3390/math12111767.

13. Kostiuk, Y., Skladannyi, P., Sokolov, V., Rzaieva, S., & Khorolska, K. (2025). Machine learning methods for detecting intrusions based on network traffic analysis. In Proceedings of the Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems II (CPITS-II 2025) (Vol. 4145, pp. 72–94). CEUR-WS.

14. Wang, W., Chen, Y., Ren, Z., & Liu, H. (2025). Two-step robust fault-tolerant controller design based on nonlinear extended state observer (NESO) for unmanned aerial vehicles (UAVs) with actuator faults and disturbances. Drones, 9(3), 183. https://doi.org/10.3390/drones9030183.

15. Komiyama, S., Uchiyama, K., & Masuda, K. (2025). Combined robust control for quadrotor UAV using model predictive control and super-twisting algorithm. Drones, 9(8), 576. https://doi.org/10.3390/drones9080576.

16. Kostiuk, Y., Skladannyi, P., Rzaieva, S., Samoilenko, Y., & Korshun, N. (2025). Intelektualni systemy keruvannia ta zakhystu v kiberfizychnykh i khmarnykh seredovyshchakh Smart Grid. [Intelligent control and protection systems in cyber-physical and cloud-based Smart Grid environments.] *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika - Cybersecurity: Education, Science, Technology, 2*(30), 125–156. https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.30.956.

17. Majid, A. R. A., & Aouaichia, A. (2025). Intelligent active disturbance rejection controller based on adaptive neuro fuzzy inference system for the quadrotor system. Discover Robotics, 1, 8. https://doi.org/10.1007/s44430-025-00009-x.

18. Yang, H., Qu, Q., Li, W., Chen, X., & Xie, M. (2025). Robust tracking of quadrotor unmanned aerial vehicles based on a linear active disturbance rejection framework. IFAC-PapersOnLine, 59, 495–500. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2025.11.682.

19. Rzaeva, S., Skladannyi, P., Kostiuk, Y., Abramov, V., & Kravchenko, V. (2025). Adaptive information security management in cloud-oriented intelligent transportation systems. Ukrainian Scientific Journal of Information Security, 31(1), 23–36. https://doi.org/10.18372/2225-5036.31.20634.

20. Hu, X., Wang, B., Shen, Y., Fu, Y., & Li, N. (2023). Disturbance observer-enhanced adaptive fault-tolerant control of a quadrotor UAV against actuator faults and disturbances. Drones, 7(8), 541. https://doi.org/10.3390/drones7080541.

21. Skladannyi, P., Kostiuk, Y., Sokolov, V., & Khorolska, K. (2026). Network traffic analysis and management. In A. L. Agbotiname et al. (Eds.), Handbook of cybersecurity challenges and solutions for emerging technologies (pp. 148–172). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003640790-9.

22. Madebo, M., Abdissa, C., Negash, L., & Negash, D. (2024). Robust tracking control for quadrotor UAV with external disturbances and uncertainties using neural network-based MRAC. IEEE Access. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3374894.

Дата першого надходження статті до видання: 20.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.01.2026

UDC 629.735.05:004.89

Mykola Kucheriavyi[1], Hennadii Hulak[2]

[1]PhD student
Institute for Problems of Mathematical Machines and Systems National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
E-mail: bu9free@gmail.com. **ORCID**: https://orcid.org/0009-0005-0017-9797

[2]Doctor of Sience, Professor,
Professor of the Department of Information and Cyber Security named after Professor Volodymyr Buriachok
Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University (Kyiv, Ukraine)
Institute for Problems of Mathematical Machines and Systems National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
E-mail: hulak@kubg.edu.ua. **ORCID**: https://orcid.org/0000-0001-9131-9233

DECISION-MAKING MODEL IN THE CONTROL DEPENDABILITY SUPPORT SYSTEM OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

The rapid expansion of unmanned aerial vehicle (UAV) applications in military, civilian, monitoring, and logistics domains increases the requirements for resilience, continuity, and safety of their control systems. In real operating conditions, UAVs function in an uncertain environment characterized by stochastic disturbances, degradation of hardware and software components, resource limitations, and potential cyber impacts on telemetry and communication channels. Under such conditions, static threshold mechanisms and rigid mode-switching strategies fail to ensure proactive response and may reduce control stability and mission efficiency.

The problem addressed in this study is the lack of a formalized decision-making model within a control dependability support system that integrates predicted state indicators, risk assessment, and resource constraints into a unified procedure for adaptive control at a meta-level relative to the baseline autopilot.

The objective of the research is to develop a formalized decision-making model for UAV control dependability support based on predictive indicators, multi-criteria risk evaluation, and fuzzy logic for regulating adaptive intervention intensity.

The UAV is described by a nonlinear discrete-time dynamic model, while the support system acts as a supervisory layer that does not replace the autopilot but determines a normalized intervention coefficient for adjusting control modes. An integral dependability index and a safety reserve relative to a critical threshold are introduced, and a safe set of states with its invariance condition is defined. A sliding-horizon forecast of the safety reserve and a logistic risk model are constructed. Decision-making is based on a compact vector of indicators processed by a Mamdani fuzzy inference system with centroid defuzzification to ensure smooth control adaptation.

Simulation of a quadrotor under disturbance and thrust degradation demonstrates preservation of a positive safety reserve, reduction of peak risk, and improved robustness compared to the baseline mode, confirming the effectiveness of the proposed approach.

Keywords: *unmanned aerial vehicles; dependability; decision support system; fuzzy logic; multi-criteria evaluation; state prediction; risk-oriented control; invariance of the safe set.*

Fig.: 6. References: 22.

Кучерявий М. В., Гулак Г. М. Модель прийняття рішень у системі підтримки гарантоздатності управління безпілотних літальних апаратів. *Технічні науки та технології*, 2026. № 1(43). С. 195-215. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-195-215.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-216-228
УДК 004.9

Кирило Олегович Насенок[1], Марія Михайлівна Войцеховська[2]

[1]аспірант, здобувач наукового ступеня доктор філософії за спеціальністю 122
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: kaboo@stu.cn.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0004-0972-7086

[2]доктор філософії, доцент кафедри інформаційних технологій і програмної інженерії
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: m.voitsekhovska@stu.cn.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-1711-101X

МЕТОД АНАЛІЗУ ТА ОЦІНЮВАННЯ СКЛАДНОСТІ МІГРАЦІЇ ВЕБЗАСТОСУНКІВ ІЗ КЛІЄНТСЬКИМ РЕНДЕРИНГОМ ДЛЯ ПОБУДОВИ АДАПТИВНИХ ПАТЕРНІВ ПЕРЕХОДУ ДО СЕРВЕРНОГО РЕНДЕРИНГУ

У статті представлено результати дослідження, присвяченого аналізу вебзастосунків із клієнтським рендерингом у контексті їх подальшої міграції до серверного рендерингу. Зокрема, розглянуто структуру сучасних React-застосунків, методи автоматизованого збору архітектурних характеристик та побудову формалізованої моделі, що відображає взаємозв'язки між компонентами, маршрутами, медіаресурсами та точками взаємодії з API. Проаналізовано вплив різних груп показників – таких як глибина дерев компонентів, інтенсивність мережевих викликів, залежність від браузерних API та ступінь перевикористання модулів – на загальну складність потенційної міграції. Описано підхід до побудови метрик та інтегральної оцінки складності сторінок, що може бути використаний для подальшої розробки динамічних патернів переходу від клієнтського до серверного рендерингу. Досліджено можливості застосування запропонованої моделі як вхідних даних для майбутніх рішень щодо оптимального вибору стратегії міграції, визначено наявний прогрес і окреслено пріоритетні напрями подальших робіт у цьому напрямі. Результати дослідження можуть бути використані для планування, оцінювання та поетапної трансформації великих промислових вебзастосунків.

Ключові слова: *клієнтський рендеринг; вебдодаток; клієнтський додаток; аналіз; всесвітня мережа; патерн.*
Табл.: 1. Рис.: 1. Бібл.: 19.

Актуальність теми дослідження. Сучасна вебекосистема значною мірою спирається на клієнтський JavaScript-код та односторінкові вебзастосунки (SPA), у яких формування інтерфейсу відбувається у браузері [1]. Провідні фреймворки (такі як React) стали стандартом для побудови складних інтерфейсів, якими користуються мільйони користувачів [2]. Значна частина бізнес-критичних систем – такі як інтернет-магазини, SaaS-платформи, корпоративні кабінети – реалізовані як великі React-застосунки з клієнтським рендерингом [3].

Накопичений досвід експлуатації таких систем виявляє типові недоліки клієнтського рендерингу: значні обсяги JavaScript-коду, повільне початкове завантаження, підвищене навантаження на клієнтські пристрої, обмеження щодо SEO та доступності [3; 4]. Тому індустрія демонструє стійкий тренд до повернення серверного рендерингу (SSR) як засобу покращення продуктивності та видимості в пошукових системах.

Для існуючих великих React-застосунків перехід від клієнтського до серверного рендерингу є складним і дорогим проєктом, що потребує зважених рішень [5]. Тому актуальною є задача розроблення методу аналізу таких застосунків, який дає змогу автоматизовано зібрати структуровані дані про їхню будову й поведінку та використати ці дані як основу для побудови патернів міграції до серверного рендерингу [5; 6].

Постановка проблеми. Типовий React-застосунок із клієнтським рендерингом являє собою велику кодову базу з сотнями компонентів, десятками маршрутів, множиною медіаресурсів та численними точками доступу до API. Планування міграції до SSR або гібридної архітектури вимагає визначити:

- найскладніші за структурою та навантаженням сторінки та маршрути;
- зосередження основних зон взаємодії з бекендом;
- «вузлові» компоненти з погляду повторного використання;
- частину застосунку, яку можна перенести на серверний рендеринг поетапно, з мінімальним ризиком.

© К. О. Насенок, М. М. Войцеховська, 2026

На практиці такі рішення часто ухвалюються на основі локального досвіду команди й фрагментарного ручного аналізу коду. Наявні інструменти статичного аналізу JavaScript/TypeScript зосереджені переважно на виявленні помилок, порушень стилю та вразливостей, але не формують цілісної архітектурної моделі застосунку, орієнтованої на завдання міграції [6].

У цьому контексті виникає потреба в методі, який визначає, які саме дані необхідно зібрати про великий React-застосунок із клієнтським рендерингом, описує процедури автоматизованого видобування цих даних із вихідного коду (за допомогою AST-аналізу та побудови структур вищого рівня) та формує машиночитну модель застосунку (у вигляді графів і дерев), що може стати вхідними даними для подальших алгоритмів побудови патернів міграції.

У представленій роботі основна увага приділяється саме першим двом пунктам: аналізу React-застосунку та збору необхідних структурних і семантичних даних. Власне синтез патернів міграції (з урахуванням обмежень замовника – бюджету, строків, розміру команди, допустимої поетапності, пріоритетів сторінок) розглядається як наступний етап дослідження, що виходить за межі цієї статті.

Аналіз останніх публікацій. Питання вибору стратегії рендерингу вебзастосунків – клієнтської, серверної чи гібридної – вже тривалий час є предметом досліджень [7]. У багатьох оглядових роботах систематизовано основні підходи (CSR, SSR, SSG та інші) та показано їхній вплив на продуктивність, SEO й архітектуру застосунків, зокрема у контексті односторінкових застосунків на базі React [8]. Паралельно здобули подальшого розвитку концепції гібридного рендерингу, де поєднується клієнтський та серверний рендеринг з метою зменшення навантаження на клієнт та мережу [9; 10].

Окрема група публікацій присвячена практичній міграції від клієнтського рендерингу до серверного. У дослідженнях M. Iskandar та T. Ojala наведено порівняльні експерименти CSR/SSR і проаналізовано типові перешкоди міграції: залежність від browser-only API, відсутність чіткого розділення шарів, складність перенесення логіки запитів до API [5, 11]. У своїх роботах Swostik Pati та Yasir Zaki розглядають приклади переходу від «чистого» React до Next.js; у дослідженні продемонстровано вплив CSR, SSR, SSG на Core Web Vitals і SEO для реальних застосунків [8-9].

Вагомий внесок належить практикам із великих технологічних компаній. Addy Osmani (Google Chrome) детально описує вплив обсягу клієнтського JavaScript і вибору стратегії рендерингу на показники продуктивності та користувацький досвід [12]. Guillermo Rauch (Vercel) та команда Next.js демонструють еволюцію від простого SSR для React до платформи, що поєднує SSR, SSG та edge-рендеринг, і пропонують деякі патерни поетапної міграції [13]. Команда React (зокрема, Dan Abramov) у контексті React Server Components описує нові моделі розподілу логіки між клієнтом і сервером, які ще більше загострюють питання структури компонентів і залежностей у великих кодових базах [14].

Паралельно досліджуються архітектурні патерни поетапної міграції – Strangler Fig, мікрофронтенди, islands-архітектура та часткова гідратація. У працях консультантів і архітекторів з AWS, ThoughtWorks та інших компаній ці патерни описуються як спосіб уникнути повного переписування системи: нові модулі поступово «обплітають» legacy-застосунок, а маршрути та функціональність перенаправляються до нової реалізації [15-16]. Проте ці підходи, як правило, формулюються у вигляді високорівневих рекомендацій і майже не пов’язуються з формальними характеристиками конкретного React-проєкту, такими як глибина дерев компонентів, щільність API-викликів чи ступінь перевикористання модулів.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Більшість наявних робіт зосереджена або на порівнянні моделей рендерингу та фреймворків, або на описі окремих кейсів міграції [17]. Інструменти аналізу, що згадуються в літературі (Lighthouse, WebPageTest, статичні аналізатори коду), орієнтовані на вимірювання продуктивності рантайму чи якості коду, але не формують цілісної структурної моделі React-застосунку – графа компонентів, дерев маршрутів, реверсивних дерев залежностей та системи метрик, спеціально орієнтованих на задачу міграції CSR до SSR [18]. На сьогодні відсутні методи, які б описували, які саме дані потрібно автоматично зібрати та проаналізувати з великого React-додатка (про архітектуру, сторінки, компоненти, медіа, API-виклики), і як ці дані мають бути представлені, щоб надалі слугувати основою для побудови патернів міграції від клієнтського до серверного рендерингу.

Тому питання системного аналізу великого React-застосунку як об'єкта майбутньої міграції із побудовою формалізованої моделі його структури та залежностей, залишаються переважно поза фокусом існуючих робіт [19].

Мета дослідження полягає в розробленні методу аналізу вебзастосунків з клієнтським рендерингом (на прикладі React), який буде здатний забезпечити автоматизований збір структурних та семантичних даних про архітектуру, сторінки, компоненти, медіаресурси й API-виклики. Отримана інформаційна модель має слугувати основою для подальшої побудови патернів міграції від клієнтського до серверного рендерингу.

Виклад основного матеріалу. У межах цього дослідження об'єктом аналізу є вебзастосунок, реалізований на базі фреймворку React з клієнтським рендерингом та використанням маршрутизації на стороні клієнта. Формально структура такого застосунку описується як орієнтований граф компонентів $G = (V, E)$, де V – множина React-компонентів, а $E \subseteq V \times V$ – множина дуг, кожна з яких відображає спрямований зв'язок між компонентами (наприклад, імпорт дочірнього компонента в батьківській) [17].

Підмножину $V_{\text{route}} \subset V$ утворюють компоненти-сторінки, що відповідають окремим маршрутам (route) застосунку. Для кожного маршруту $r \in R$ задається кореневий компонент $v_r \in V_{\text{route}}$, від якого розгортається дерево вкладених компонентів $T_r = (V_r, E_r)$. У цій структурі множина дуг $E_r \subset E$ описує ієрархію сторінки, відображаючи всі виклики підкомпонентів, необхідних для формування цілісного інтерфейсу в межах такого маршруту.

Окрім аналізу топології графа, для кожного компонента $v_i \in V$ та для кожного маршруту $r \in R$ визначається набір метрик, які характеризують: розмір та складність коду (L), інтенсивність взаємодії з API (A), кількість та тип медіаресурсів (M), структурну складність дерева компонентів (N, D, S), ступінь перевикористання компонента в різних маршрутах (RU), залежність від браузерних API (B), що ускладнюють серверний рендеринг.

Збирання цих метрик здійснюється автоматизовано на основі статичного аналізу коду: вихідні файли перетворюються в абстрактні синтаксичні дерева (AST), над якими виконуються обходи з метою виявлення компонентів, імпортів, функціональних структур в коді, викликів HTTP/GraphQL-клієнтів, медіаімпортів та ін. [14, 15] (рис. 1). У результаті формується машиночитна модель застосунку (у вигляді JSON-структури), що містить глобальні метрики проєкту, опис кожного компонента, дерева сторінок та реверсивні дерева залежностей [16]. Ця модель є основою як для подальшої оцінки складності міграції, так і для наступного етапу – побудови патернів переходу від клієнтського до серверного рендерингу.

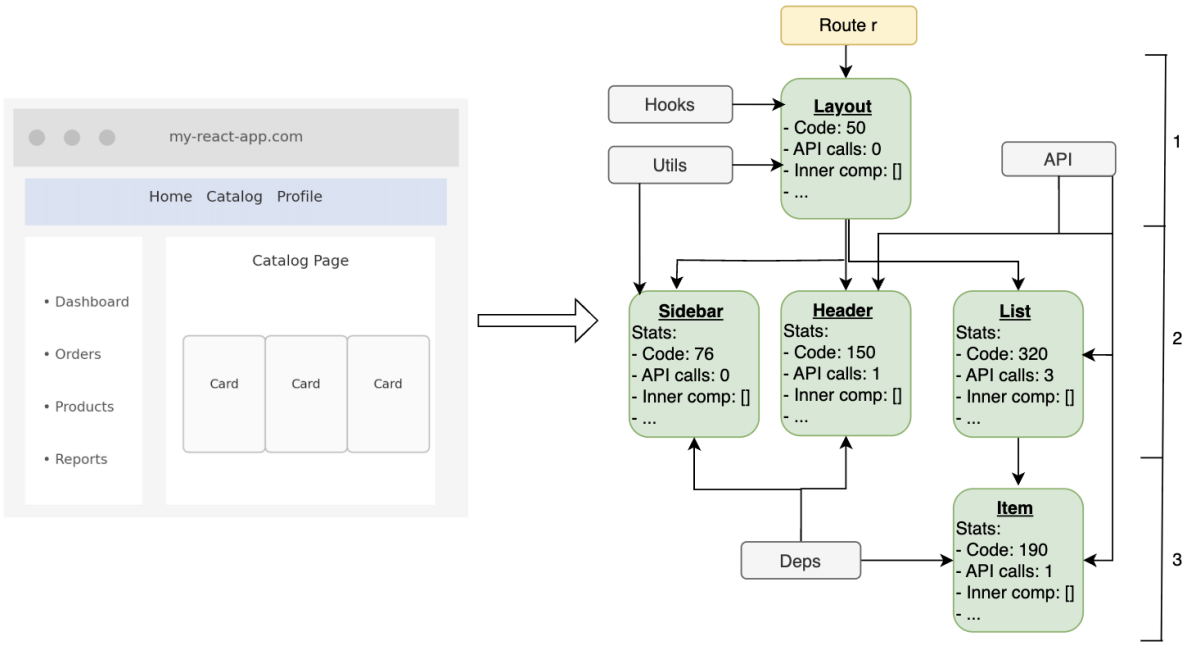


Рис. 1. Графічне представлення графа компонентів та маршрутів, що представляє структуру вебдодатка

Джерело: розроблено авторами.

Глобальні метрики проєкту. На глобальному рівні для всього проєкту збирається набір агрегованих показників:

1. Кількість файлів вихідного коду (N_{files}) – дає уявлення про масштаб кодової бази.
2. Сумарна кількість рядків коду (LOC_{total}) та середня кількість рядків на файл/компонент (LOC_{avg}) – використовуються як базові індикатори розміру системи.
3. Кількість виявлених React-компонентів (N_{comp}) та кількість компонентів-сторінок (N_{page}) – характеризують структурну складність інтерфейсу з погляду модульності.
4. Загальна кількість медіаресурсів (N_{media}) – з розподілом за типами (зображення, відео, аудіо, інші). Обсяг та тип медіа впливають на продуктивність та визначають потребу в оптимізації при міграції.
5. Кількість унікальних точок виклику API (N_{api}) – (HTTP, GraphQL та інші мережеві взаємодії). Цей показник відображає загальний обсяг логіки доступу до даних, що, як правило, потребує істотного перегляду при переході до SSR.
6. Розподіл компонентів за роллю – класифікація на презентаційні, контейнерні, компоненти-сторінки та утилітарні модулі. Це дозволяє виділити «легкі» зони для першочергової міграції та «важкі» зони з інтенсивною бізнес-логікою.

Глобальні метрики застосовуються для нормалізації локальних показників (зокрема, через обчислення відношення характеристики i-го компонента v_i до її максимального значення в межах проєкту, наприклад LOC_{max}) та для формування загального профілю складності застосунку [4, 6].

Метрики на рівні компонентів. Для кожного компонента $v_i \in V$ виділяється наступний набір метрик, що дозволяють кількісно оцінити складність його майбутньої адаптації до серверного середовища:

1. Розмір компонента. $LOC_{v_i} \in \mathbb{N}$ – кількість рядків коду, що належать компоненту (функції, класу або функціональному виразу, асоційованому з ними). Значення LOC_{v_i} нормалізується:

$$L_{\text{norm},v_i} = \begin{cases} \frac{\log\left(1+LOC_{v_i}\right)}{\log(1+LOC_{\max})}, \text{ якщо } LOC_{\max} > 0 \\ 0, \text{ якщо } LOC_{\max} = 0 \end{cases},$$

де $LOC_{\max}$ – максимальний розмір компонента в проєкті. Логарифмічна нормалізація зменшує вплив аномально великих компонентів.

2. Інтенсивність взаємодії з API. Для компонента v_i обраховуються:

– A_{http,v_i} – кількість викликів HTTP/REST-клієнтів (fetch, axios тощо);
– A_{gql,v_i} – кількість викликів GraphQL-клієнтів (наприклад, useQuery з @apollo/client);
– A_{other,v_i} – інші мережеві взаємодії (WebSocket, custom-клієнти).

Формується зважена оцінка складності роботи з даними:

$$A_{\text{raw},\, v_i} = w_{\text{http}} \cdot A_{\text{http},v_i} + w_{\text{gql}} \cdot A_{\text{gql},v_i} + \text{w}_{\text{other}} \cdot A_{\text{other},v_i}, \quad (1)$$

де вагові коефіцієнти відображають припущення, що GraphQL-запити і тривалі з'єднання (WebSocket тощо) зазвичай складніші для міграції, ніж прості REST-виклики [5]. Нормалізація:

$$A_{\text{norm},v_i} = \begin{cases} \frac{\log\left(1+A_{\text{raw},\, v_i}\right)}{\log(1+A_{\max})}, \text{ якщо } A_{\max} > 0 \\ 0, \text{ якщо } A_{\max} = 0 \end{cases},$$

де A_{max} – максимальне значення зваженої оцінки A_{raw}, виявлене серед усіх компонентів проєкту.

3. Медіанавантаження компонента. Компоненту v_i відповідають значення: $M_{\text{img},\, v_i}$, M_{video,v_i}, M_{other,v_i} – кількість імпортованих зображень, відео та інших медіа. Зважена оцінка:

$$M_{\text{rav},v_i} = w_{\text{img}} \cdot M_{\text{img},\, v_i} + \text{w}_{video} \cdot M_{\text{video},v_i} + \text{w}_{other} \cdot M_{\text{other},v_i},$$

де вагові коефіцієнти відображають вплив на продуктивність і складність оптимізації. Нормалізація:

$$M_{\text{norm},v_i} = \begin{cases} \frac{\log\left(1+M_{\text{raw},\, v_i}\right)}{\log(1+M_{\max})}, \text{ якщо } M_{\max} > 0 \\ 0, \text{ якщо } M_{\max} = 0 \end{cases},$$

де $M_{\max}$ – максимальне значення зваженої оцінки медіанавантаження в проєкті.

4. Залежність від браузерних API. Цей показник є важливою складовою оцінки складності адаптації компонента до SSR. Для SSR критичним є використання об'єктів на кшталт window, document, localStorage, прямої роботи з DOM, а також API, доступних лише у браузері. Для компонента v_i фіксується B_{v_i} – кількість унікальних точок використання таких конструкцій [6]. Вводиться нормована величина:

$$B_{\text{norm},v_i} = \begin{cases} \frac{B_{v_i}}{B_{\max}}, \text{ якщо } B_{\max} > 0 \\ 0, \text{ якщо } B_{\max} = 0 \end{cases},$$

де $B_{\max}$ – максимум по всіх компонентах.

5. Ступінь перевикористання компонента. Для кожного компонента v_i визначається кількість маршрутів $r \in R$, у яких він використовується: $RU_{v_i} = |\{r \in R: v_i \in V_r\}|$. Компонент із високим RU_{v_i} є архітектурним «вузлом»: зміни, пов'язані з його міграцією, потенційно впливають на велику кількість сторінок. Нормована величина:

$$RU_{\text{norm},v_i} = \begin{cases} \frac{RU_{v_i}-1}{RU_{\max}-1}, \text{ якщо } RU_{\max} > 1 \\ 0, \text{ якщо } RU_{\max} = 1 \end{cases},$$

де RU_{max} – максимальна кількість маршрутів для одного компонента в межах проєкту. При $RU_{v_i} = 1$ показник $RU_{\text{norm},v_i} = 0$, що відповідає використанню компонента лише в одному контексті.

6. Включеність у циклічні залежності. Аналіз графа G дозволяє виявити компоненти, що входять до циклів. Для компонента v_i задається бінарний індикатор: $C_{\text{cycle},v_i} \in \{0,1\}$. Циклічні залежності ускладнюють поетапну міграцію, оскільки заважають ізолювати підмножини компонентів.

На основі розрахованих метрик для кожного компонента $v_i \in V$ визначається інтегральна оцінка складності міграції C_{comp,v_i}, яка дозволяє формалізувати оцінку трудовитрат та виявити архітектурні ризики на етапі планування. Інтегральна модель базується на зваженій сумі нормованих показників:

$$C_{\text{comp},v_i} = w_{A,v} \cdot A_{\text{norm},v_i} + w_{B,v} \cdot B_{\text{norm},v_i} + w_{RU,v} \cdot RU_{\text{norm},v_i} + \\ + w_{L,v} \cdot L_{\text{norm},v_i} + w_{M,v} \cdot M_{\text{norm},v_i} + w_{C,v} \cdot C_{\text{cycle},v_i}. \quad (2)$$

Визначення вагових коефіцієнтів w базується на поєднанні емпіричного підходу та методики MAI [20]. Підхід ґрунтується на реверсивному аналізі вже виконаних міграцій, у межах якого компоненти розглядалися з позиції фактичних трудовитрат і обсягу архітектурних змін, необхідних для їх адаптації до серверного середовища. Такий аналіз дозволяє якісно оцінити, які характеристики мають вирішальний вплив на складність (на кшталт, залежність від браузерних API), а які відіграють допоміжну роль.

Встановлений базовий набір ваг для стандартного React-проєкту, отриманий у результаті експертного узгодження, наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Базові вагові коефіцієнти метрик складності компонента

Метрика	Коефіцієнти метрик	Значення	Обґрунтування пріоритету (згідно з [2,5,8,13])
Браузерні API	$w_{B,v}$	0,25	Пряме звернення до window чи DOM є блокером для Node.js.
Взаємодія з веб-API	$w_{A,v}$	0,3	Складність перебудови логіки отримання даних (SSR/Hydration).
Перевикористання	$w_{RY,v}$	0,2	Архітектурна значущість вузла та ризик каскадних помилок.
Розмір коду	$w_{L,v}$	0,02	Оцінка когнітивного навантаження та обсягу ручного рефакторингу.
Медіанавантаження	$w_{M,v}$	0,1	Вплив на продуктивність; вирішується переважно декларативно.
Цикли	$w_{C,v}$	0,13	Показник складності ізоляції модуля для міграції.

Важливою особливістю моделі є те, що за потреби вагові коефіцієнти можуть бути перекалібровані для конкретного проєкту (на кшталт з урахуванням специфічного стеку технологій або кваліфікації команди) без зміни структури інтегральної формули та набору використовуваних метрик. Це дозволяє адаптувати метод до різних сценаріїв розробки, зберігаючи об’єктивність порівняльного аналізу компонентів.

Бінарний індикатор C_{cycle,v_i} інтерпретується в моделі як структурне обмеження. Наявність циклів часто виступає критичним чинником («стоп-фактором»), що унеможливлює ізоляцію окремих компонентів для поетапної міграції. Незважаючи на те, що у лінійній моделі (2) цей показник має фіксовану вагу, його роль може бути посилена через введення штрафного множника (PF).

Для складних архітектур із високим рівнем зачеплення рекомендується використовувати мультиплікативну модель, де наявність циклу пропорційно збільшує сумарну складність усіх інших метрик:

$$C_{\text{comp},v_i} = \left(1 + PF \cdot C_{\text{cycle},v_i}\right) \cdot (w_{A,v} \cdot A_{\text{norm},v_i} + w_{B,v} \cdot B_{\text{norm},v_i} + \\ + w_{RU,v} \cdot RU_{\text{norm},v_i} + w_{L,v} \cdot L_{\text{norm},v_i}), \quad (3)$$

де $PF \in [0.5, 1.0]$ – штрафний коефіцієнт. Для збереження порівняльної спроможності моделей (2) та (3) передбачається, що сума вагових коефіцієнтів у мультиплікативній моделі залишається нормованою.

Така структура формули (3) має чітку інженерну інтерпретацію. За відсутності циклу ($C_{\text{cycle},v_i} = 0$) множник дорівнює одиниці, і оцінка визначається стандартною зваженою сумою показників. При виявленні циклу ($C_{\text{cycle},v_i} = 1$) загальна складність компонента зростає на величину PF (на 50-100 %). Це математично відображає той факт, що архітектурні дефекти мають синергетичний ефект: вони ускладнюють роботу з кожним іншим аспектом компонента – від рефакторингу логіки API до виправлення браузерних залежностей.

Вибір між моделями (2) та (3) визначається пріоритетами аналізу: лінійна модель (2) є оптимальною для агрегованого розрахунку загальних трудовитрат (Man-hours), тоді як модель (3) слугує інструментом ризик-менеджменту, дозволяючи ідентифікувати критичні «вузли» архітектури, міграція яких є ризикованою без попереднього рефакторингу.

Метрики на рівні сторінок і структурних дерев. Для кожного маршруту $r \in R$ із кореневим компонентом v_r аналізується дерево компонентів T_r, побудоване на основі аналізу залежностей та імпортів.

1. Кількість вузлів і глибина дерева: $|V_r|$ – потужність множини компонентів у дереві (фактична кількість унікальних вузлів на сторінці), H_r – максимальна глибина дерева.

Нормовані показники зі зміщенням для врахування мінімально можливої структури (один корінь):

$$|V|_{\text{norm},r} = \frac{|V_r|-1}{|V|_{\max}-1}, \; H_{\text{norm},r} = \frac{H_r-1}{H_{\max}-1},$$

де $|V|_{\max}$, $H_{\max}$ – відповідно максимальні значення по всіх маршрутах.

2. Середній ступінь перевикористання компонентів $RU_{\text{avg},r}$, що відображає, на скільки сторінка «поділяє» компоненти з іншими маршрутами:

$$RU_{\text{avg},r} = \frac{1}{|V_r|} \sum_{v_i \in V_r} RU_{\text{norm},\, v_i}.$$

3. Структурна складність дерева. Вводиться інтегральний структурний показник $S_{\text{struct},r}$, який одночасно враховує розгалуженість і глибину:

$$S_{\text{struct},r} = 0.5 \cdot |V|_{\text{norm},r} + 0.5 \cdot H_{\text{norm},r}.$$

Метод автоматизованого збирання даних. Метод передбачає такі основні кроки:

1. Побудова AST для кожного файлу. Код усіх .js/.jsx/.ts/.tsx файлів парсується у вигляді абстрактних синтаксичних дерев. Для цього використовуються інструменти рівня Babel-parser або їхні аналоги.

2. Виявлення компонентів та їх меж. На рівні AST ідентифікуються функціональні та класові компоненти (за поєднанням імені у PascalCase та наявності JSX) та компоненти, що є кореневими для сторінок $v_r \in V_{\text{route}}$ (компоненти-цілі для конфігурацій Route).

3. Побудова графа компонентів. Обхід синтаксичних дерев дозволяє сформувати множину дуг E: якщо у компоненті v_i використано дочірній компонент v_j, до графа $G = (V, E)$ додається дуга $e = (v_i, v_j)$.

4. Побудова дерев маршрутів. На основі конфігурацій маршрутизатора (JSX-Route-елементи або об'єктні конфігурації) встановлюється зв'язок «маршрут r - кореневий компонент v_r». Далі шляхом обходу графа формується дерево T_r для кожного маршруту $r \in R$.

5. Побудова реверсивних дерев. Інверсія графа G дозволяє побудувати для кожного компонента v_i множину батьківських компонентів, які його використовують. Це дозволяє розрахувати показник перевикористання RU_{v_i}, а також виявити архітектурні вузли та циклічні залежності C_{cycle} [14].

6. Виявлення API-викликів та медіаімпортів. На AST-рівні аналізуються імпортовані модулі (axios, @apollo/client, інші HTTP/GraphQL-клієнти), виклики хуків та функцій, що відповідають за мережеві взаємодії N_{api} та імпорти файлів за розширеннями для оцінки медіаресурсів N_{media} [11].

7. Формування інтегрованої моделі у вигляді JSON. Зібрані дані агрегуються у структуру, що містить: глобальні метрики проєкту (кількість файлів N_{files}, загальний LOC); опис кожного компонента v_i з відповідними метриками (описи дерев сторінок, реверсивні дерева й граф компонентів); опис кожного компонента v_i з відповідними метриками (L, A, M, RU, B), описи дерев сторінок T_r, реверсивні дерева й граф компонентів G.

Ця процедура дає змогу повністю автоматизувати збирання даних без залучення розробника, що особливо важливо для великих проєктів.

Модель оцінювання складності сторінок для міграції. Для кожної сторінки (маршруту) r пропонується обчислювати інтегральну оцінку складності міграції $C_{\text{base},r}$ [4]. Вона повинна відображати сумарний вплив складності роботи з даними, архітектурної специфіки дерева компонентів, інтенсивності використання спільних модулів, наявності браузерних залежностей, обсягу коду та медіанавантаження.

Процес оцінювання починається з визначення нормованих підпоказників для конкретного маршруту r:

1. Дані (data-complexity). D_r – характеризує інтенсивність взаємодії з API через логарифмічну шкалу, що дозволяє згладити вплив сторінок із надмірною кількістю запитів:

$$D_r = \frac{\log(1+A_{\text{rav},r})}{\log(1+A_{\max})},$$

де $A_{\text{rav},r}$ – зважена сума API-викликів для маршруту r;

$A_{\max}$ – глобальний максимум, виявлений серед усіх компонентів проєкту.

2. Структура (structure). S_r – показник архітектурної складності, що відображає розгалуженість і глибину дерева компонентів сторінки: $S_r = S_{\text{struct},r}$.

3. Перевикористання (reuse). RU_r – відображає середній рівень перевикористання компонентів, що входять до складу такого маршруту: $RU_r = RU_{\text{avg},r}$.

4. Браузерні залежності (browser-boundness). B_r – оцінює ступінь прив'язки коду сторінки до браузерних API (window, document тощо), що потребують адаптації для серверного середовища:

$$B_r = \frac{B_{\text{rav},r}}{B_{\max}},$$

де $B_{\text{rav},r}$ – сумарна кількість точок використання браузерних API у межах маршруту r;

$B_{\max}$ – максимальне значення таких залежностей серед усіх маршрутів.

5. Медіа (media-intensity). M_r – логарифмічна оцінка насиченості маршруту медіаресурсами (зображеннями, відео), що впливає на стратегію оптимізації продуктивності рендерингу:

$$M_r = \frac{\log(1+M_{\text{rav},r})}{\log(1+M_{\max})},$$

де $M_{\text{rav},r}$ – зважена сума медіаресурсів, ідентифікованих у межах маршруту r;

$M_{\max}$ – максимальне значення медіанавантаження в проєкті.

6. Обсяг коду (code size). L_r – нормалізує сумарну кількість рядків коду (LOC) всіх компонентів, що формують маршрут:

$$L_r = \frac{\log(1+LOC_r)}{\log(1+LOC_{\max}^{\text{page}})},$$

де LOC_r – сумарна кількість рядків коду компонентів маршруту r;

$LOC_{\max}^{\text{page}}$ – максимальний обсяг коду серед усіх сторінок проєкту.

Тоді інтегральна оцінка задається як:

$$C_{\text{base},r} = \left(w_{D,r} \cdot D_r + w_{S,r} \cdot S_r + w_{RU,r} \cdot RU_r + w_{B,r} \cdot B_r + w_{M,r} \cdot M_r + w_{L,r} \cdot L_r\right).$$

Вагові коефіцієнти $w_{k,r}$ визначаються аналогічно до інтегральної оцінки на рівні компонентів.

Допоміжні оцінки. Окрім інтегрального показника $C_{\text{base}}(r)$, доцільно зберігати допоміжні оцінки, які дозволяють точніше інтерпретувати характер складності:

1. Data-score ($C_{\text{data},r} = 100 \cdot D_r$) – характеризує «вагу» логіки доступу до даних та мережевих взаємодій.

2. Structure-score ($C_{\text{struct},r} = 100 \cdot S_r$) – відображає розгалуженість і глибину дерева.

3. Reuse-score ($C_{\text{reuse},r} = 100 \cdot RU_r$) – показує, наскільки сторінка побудована на компонентах, спільних з іншими маршрутами.

4. Browser-score ($C_{\text{browser},r} = 100 \cdot B_r$) – відображає ступінь прив'язки до браузерних API.

5. Media-score ($C_{\text{media},r} = 100 \cdot M_r$) – оцінює інтенсивність медіанавантаження та потребу в декларативній оптимізації ресурсів.

Ці значення є суттєвими для подальшого вибору патернів міграції: наприклад, сторінки з високим $C_{\text{data},r}$ та низьким $C_{\text{struct},r}$ можуть потребувати іншої стратегії, ніж сторінки з високим $C_{\text{struct},r}$ та помірним $C_{\text{data},r}$.

Використання оцінок для вибору стратегій майбутньої побудови патернів міграції. Запропонована система метрик та оцінок не є самоціллю, вона розглядається як інформаційна база для побудови патернів міграції від клієнтського до серверного рендерингу.

Кластеризація сторінок за вектором характеристик. Кожен маршрут r описується вектором:

$$x_r = \left(C_{\text{data},r}, C_{\text{struct},r}, C_{\text{reuse},r}, C_{\text{browser},r}, C_{\text{media},r}, C_{\text{base},r}\right), \quad (4)$$

за яким сторінки можуть бути згруповані у типові класи [7].

Поєднання технічних оцінок із організаційними параметрами. До технічного вектора додаються дані від замовника: бюджет міграції, строки, розмір і компетенції команди, можливість поетапної міграції, перелік бізнес-критичних сторінок. У результаті формується багатокритеріальна задача: за наявних ресурсів і обмежень обрати такі підмножини сторінок і відповідні патерни міграції, які мінімізують сукупний ризик та максимізують ефект (покращення продуктивності, SEO тощо) [10].

Віднесення сторінок до патернів міграції. На основі векторів характеристик сторінки можуть бути віднесені до того чи іншого попередньо визначеного патерну, наприклад, «рання міграція SEO-критичних контентних сторінок до SSR/SSG», «часткова міграція data-heavy панелей із виділенням серверного рендерингу контейнерних компонентів» або «виділення layout-компонентів із високим fan-in у окремі SSR-модулі» тощо [18]. Таким чином, запропонована модель оцінювання забезпечує не лише кількісну характеристику складності, але й структуру, необхідну для алгоритмічної підтримки побудови динамічних патернів міграції.

У межах цієї статті основний акцент зроблено не на повному циклі міграції вебзастосунків до серверного рендерингу, а на розробленні методу попереднього аналізу

React-застосунків із клієнтським рендерингом. Запропонований підхід зосереджений на автоматизованому збиранні характеристик застосунку, побудові формалізованої моделі його компонентної структури, а також на визначенні системи кількісних метрик для оцінювання відносної складності потенційної міграції окремих компонентів і сторінок.

Висновки. У роботі розглянуто задачу попереднього аналізу великих React-застосунків із клієнтським рендерингом як необхідної передумови для побудови патернів міграції до серверного або гібридного рендерингу. Аналіз теоретичних напрацювань та практичного досвіду показав, що попри наявність численних досліджень, присвячених порівнянню моделей рендерингу та опису окремих кейсів міграції, формалізовані методики структурного аналізу SPA-застосунків у контексті міграції практично відсутні. Як внесок пропонується:

1. Формалізація структури React-застосунку у вигляді орієнтованого графа компонентів, множини дерев сторінок та реверсивних дерев залежностей.

2. Система метрик для глобального, компонентного та сторінкового рівнів, що включає глобальні показники масштабу проєкту, метрики для кожного компонента, структурні показники дерев сторінок.

3. Метод автоматизованого збирання даних на основі статичного AST-аналізу, що дозволяє без участі розробника побудувати машиночитну модель проєкту (наприклад, у форматі JSON) з усіма необхідними метаданими.

4. Модель оцінювання складності сторінок для міграції, яка включає: інтегральну оцінку складності $C_{base}(r)$ на основі зваженої комбінації нормованих показників, глибинно зважену оцінку, що враховує різний внесок верхньорівневих і глибоко вкладених компонентів та набір допоміжних оцінок, що дозволяють детальніше інтерпретувати характер складності.

Таким чином, результати цього дослідження формують методологічний та інструментальний фундамент для побудови динамічних патернів міграції вебзастосунків із клієнтським рендерингом до серверного, що є важливим кроком у напрямку системної та керованої трансформації сучасних SPA-архітектур.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті

Під час написання цього матеріалу автори використовували ChatGPT (версія 5.2, OpenAI) як допоміжний інструмент для уточнення формулювань окремих речень, покращення стилістичної узгодженості тексту, а також для контекстного обговорення термінів і підходів, пов’язаних із предметною областю дослідження. Після використання цього інструменту/сервісу автори переглянули та відредагували зміст за потреби і взяли на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Lindner, J. (n.d.). *Must-known internet traffic statistics*. https://gitnux.org/internet-traffic-statistics.

2. Bhatt, D., Parekh, K., Minat, M., & Patel, B. (2023). ReactJS: A comprehensive analysis of its features, performance, and suitability for modern web development. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management (IJSREM)*. https://doi.org/10.55041/IJSREM25667.

3. Komperla, V., Pratiba, D., Ghuli, P., & Pattar, R. (2022). React: A detailed survey. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, *26*(3), 1710. https://doi.org/10.11591/ijeecs.v26.i3.pp1710-1717.

4. Kiran Challa, V. N. S. (2022). Comprehensive analysis of modern application rendering strategies: Enhancing web and mobile user experiences. *Journal of Engineering and Applied Sciences Technology*, 1-6. https://doi.org/10.47363/jeast/2022(4)248.

5. Fadhilah Iskandar, T., Lubis, M., Fabrianti Kusumasari, T., & Ridho Lubis, A. (2020). Comparison between client-side and server-side rendering in the web development. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *801*, 012136. https://doi.org/10.1088/1757-899x/801/1/012136.

6. Karthik Vallamsetla. (2024). The impact of server-side rendering on UI performance and SEO. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, *10*(5), 795-804. https://doi.org/10.32628/cseit241051067.

7. Ardiyanto, R., & Ardhianto, E. (2024). Analisa performasi metode client side rendering, server side rendering, dan incremental static regeneration dalam proses website rendering. *Computer Science (CO-SCIENCE)*, *4*(1), 19-27. https://doi.org/10.31294/coscience.v4i1.2427.

8. Hanafi, R., Haq, A., & Agustin, N. (2024). Comparison of web page rendering methods based on Next.js framework using page loading time test. *TEKNIKA: Jurnal Sains dan Teknologi*, 13(1), 102-108. https://doi.org/10.34148/teknika.v13i1.769.

9. Patel, V. (2023). Analyzing the impact of Next.js on site performance and SEO. *International Journal of Computer Applications Technology and Research*, 12(10), 24-27. https://doi.org/10.7753/IJCATR1210.1004.

10. Conti, M., Gregori, E., & Lapenna, W. (2005). Content delivery policies in replicated web services: Client-side vs. server-side. *Cluster Computing*, 8(1), 47-60. https://doi.org/10.1007/s10586-004-4436-5.

11. Tyagi, A. (2020). Optimizing digital experiences with content delivery networks: Architectures, performance strategies, and future trends. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 7(2), 401-417. https://doi.org/10.30574/wjarr.2020.7.2.0230.

12. Ekpobimi, H. O., Kandekere, R. C., & Fasanmade, A. A. (2024). Conceptual framework for enhancing front-end web performance: Strategies and best practices. *Global Journal of Advanced Research and Reviews*, 2(1), 99-107. https://doi.org/10.58175/gjarr.2024.2.1.0032.

13. Sevencan, Ç. (2024). *Optimizing web delivery: The impact of rendering methods on user experience across network conditions* (Master's thesis, California Polytechnic State University).

14. Han, H., Xue, Y., Liu, Y., & Oyama, K. (2014). Practice and evaluation of pagelet-based client-side rendering mechanism. *IEICE Transactions on Information and Systems*, E97-D(8), 2067-2083. https://doi.org/10.1587/transinf.E97.D.2067.

15. Zou, Y., Chen, Z., Zheng, Y., Zhang, X., & Gao, Z. (2014). Virtual DOM coverage for effective testing of dynamic web applications. In *Proceedings of the 2014 International Symposium on Software Testing and Analysis (ISSTA)* (pp. 313-323). https://doi.org/10.1145/2610384.2610399.

16. Bai, A. (2022). *Million.js: A fast compiler-augmented virtual DOM for the web*. arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.08409.

17. Zammetti, F. (2020). *Modern full-stack development: Using TypeScript, React, Node.js, Webpack, and Docker*. Apress. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-5738-8.

18. Osmani, A. (2019). *The cost of JavaScript in 2019*. https://addyosmani.com/blog/the-cost-of-javascript-2019.

19. Moore, R. (n.d.). *Compare and contrast: CSR, SSR, and SSG in Next.js*. https://medium.com/nerd-for-tech/compare-and-contrast-csr-ssr-and-ssg-in-nextjs-58e3caf2e15e.

20. Budaretskyi, Y., Shchavinskyi, Y., Kuznetsov, V., & Nikolaev, S. (2021). Application of the method of analysis of hierarchies to assess the software of complexes of automation means. *Military-Technical Collection*, 25, 3-12. https://doi.org/10.33577/2312-4458.25.2021.12-23.

References

1. Lindner, J. (n.d.). *Must-known internet traffic statistics*. https://gitnux.org/internet-traffic-statistics.

2. Bhatt, D., Parekh, K., Minat, M., & Patel, B. (2023). ReactJS: A comprehensive analysis of its features, performance, and suitability for modern web development. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management (IJSREM)*. https://doi.org/10.55041/IJSREM25667.

3. Komperla, V., Pratiba, D., Ghuli, P., & Pattar, R. (2022). React: A detailed survey. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, *26*(3), 1710. https://doi.org/10.11591/ijeecs.v26.i3.pp1710-1717.

4. Kiran Challa, V. N. S. (2022). Comprehensive analysis of modern application rendering strategies: Enhancing web and mobile user experiences. *Journal of Engineering and Applied Sciences Technology*, 1-6. https://doi.org/10.47363/jeast/2022(4)248.

5. Fadhilah Iskandar, T., Lubis, M., Fabrianti Kusumasari, T., & Ridho Lubis, A. (2020). Comparison between client-side and server-side rendering in the web development. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *801*, 012136. https://doi.org/10.1088/1757-899x/801/1/012136.

6. Karthik Vallamsetla. (2024). The impact of server-side rendering on UI performance and SEO. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, *10*(5), 795-804. https://doi.org/10.32628/cseit241051067.

7. Ardiyanto, R., & Ardhianto, E. (2024). Analisa performasi metode client side rendering, server side rendering, dan incremental static regeneration dalam proses website rendering. *Computer Science (CO-SCIENCE)*, *4*(1), 19-27. https://doi.org/10.31294/coscience.v4i1.2427.

8. Hanafi, R., Haq, A., & Agustin, N. (2024). Comparison of web page rendering methods based on Next.js framework using page loading time test. *TEKNIKA: Jurnal Sains dan Teknologi*, 13(1), 102-108. https://doi.org/10.34148/teknika.v13i1.769.

9. Patel, V. (2023). Analyzing the impact of Next.js on site performance and SEO. *International Journal of Computer Applications Technology and Research*, 12(10), 24-27. https://doi.org/10.7753/IJCATR1210.1004.

10. Conti, M., Gregori, E., & Lapenna, W. (2005). Content delivery policies in replicated web services: Client-side vs. server-side. *Cluster Computing*, 8(1), 47-60. https://doi.org/10.1007/s10586-004-4436-5.

11. Tyagi, A. (2020). Optimizing digital experiences with content delivery networks: Architectures, performance strategies, and future trends. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 7(2), 401-417. https://doi.org/10.30574/wjarr.2020.7.2.0230.

12. Ekpobimi, H. O., Kandekere, R. C., & Fasanmade, A. A. (2024). Conceptual framework for enhancing front-end web performance: Strategies and best practices. *Global Journal of Advanced Research and Reviews*, 2(1), 99-107. https://doi.org/10.58175/gjarr.2024.2.1.0032.

13. Sevencan, Ç. (2024). *Optimizing web delivery: The impact of rendering methods on user experience across network conditions* (Master's thesis, California Polytechnic State University).

14. Han, H., Xue, Y., Liu, Y., & Oyama, K. (2014). Practice and evaluation of pagelet-based client-side rendering mechanism. *IEICE Transactions on Information and Systems*, E97-D(8), 2067-2083. https://doi.org/10.1587/transinf.E97.D.2067.

15. Zou, Y., Chen, Z., Zheng, Y., Zhang, X., & Gao, Z. (2014). Virtual DOM coverage for effective testing of dynamic web applications. In *Proceedings of the 2014 International Symposium on Software Testing and Analysis (ISSTA)* (pp. 313-323). https://doi.org/10.1145/2610384.2610399.

16. Bai, A. (2022). *Million.js: A fast compiler-augmented virtual DOM for the web*. arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.08409.

17. Zammetti, F. (2020). *Modern full-stack development: Using TypeScript, React, Node.js, Webpack, and Docker*. Apress. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-5738-8.

18. Osmani, A. (2019). *The cost of JavaScript in 2019*. https://addyosmani.com/blog/the-cost-of-javascript-2019.

19. Moore, R. (n.d.). *Compare and contrast: CSR, SSR, and SSG in Next.js*. https://medium.com/nerd-for-tech/compare-and-contrast-csr-ssr-and-ssg-in-nextjs-58e3caf2e15e.

20. Budaretskyi, Y., Shchavinskyi, Y., Kuznetsov, V., & Nikolaev, S. (2021). Application of the method of analysis of hierarchies to assess the software of complexes of automation means. *Military-Technical Collection*, 25, 3-12. https://doi.org/10.33577/2312-4458.25.2021.12-23.

Дата першого надходження статті до видання: 12.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 02.01.2026

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

UDC 004.9

Kyrylo Nasenok[1], Mariia Voitsekhovska[2]

[1]PhD student, recipient of the Doctor of Philosophy degree in specialty 122
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: kaboo@stu.cn.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0004-0972-7086

[2]PhD, Associate Professor of the Information Technologies and Software Engineering Department
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: m.voitsekhovska@stu.cn.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-1711-101X

METHOD FOR ANALYZING AND ESTIMATING MIGRATION COMPLEXITY OF CLIENT-SIDE RENDERED WEB APPLICATIONS FOR BUILDING ADAPTIVE MIGRATION PATTERNS TO SERVER-SIDE RENDERING

In modern web development, client-side rendering remains one of the most widely used approaches for building user interfaces, particularly within the React ecosystem, which has become the dominant tool for developing scalable single-page applications. However, as the complexity and size of such systems increase, the limitations of client-side rendering become increasingly evident, including the growth of JavaScript bundle sizes, degraded initial load performance, reliance on browser-specific APIs, and challenges related to search engine optimization. In large commercial projects, these limitations create a growing demand for migration toward server-side or hybrid rendering approaches, which provide faster rendering, reduced load on client devices, and improved content accessibility.

Despite the increasing interest in server-side rendering, the industry lacks a formalized method for the preliminary analysis of large client-side applications that would enable a systematic evaluation of their architecture prior to migration. Existing tools are primarily focused on performance measurement or error detection and do not support the construction of a comprehensive structural model of an application, including component graphs, page trees, reverse dependency structures, and metrics that directly influence the complexity of migrating application logic to the server.

This paper addresses this gap by proposing a method for automated analysis of React applications based on static AST analysis and the subsequent construction of a formalized information model. A system of metrics is introduced at three levels-global, component-level, and page-level-including indicators of API interaction, dependency on browser mechanisms, component tree depth, component reuse, media load, and code size. Based on these characteristics, an integral model for estimating migration complexity is developed, enabling the comparison of pages and the assessment of potential risks when transitioning to server-side rendering.

The paper emphasizes that the proposed model can serve as a foundation for building adaptive migration patterns that combine technical characteristics of pages with organizational constraints such as budget, priorities, timelines, and the feasibility of phased transformation. The proposed methodology represents a step toward the development of tools capable of automatically recommending migration strategies, thereby optimizing the transition of large-scale SPA applications from client-side to server-side rendering.

Keywords: *client-side rendering; web application; client application; analize; worldwide network; pattern.*

Table: 1. Fig.: 1. References: 19.

Насенок К. О., Войцеховська М. М. Метод аналізу та оцінювання складності міграції вебзастосунків із клієнтським рендерингом для побудови адаптивних патернів переходу до серверного рендерингу. *Технічні науки та технології*, 2026. № 1(43). С. 216-228. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-216-228.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-229-245
УДК 004.94:004.8

Владислав Олексійович Прищепа[1], Артем Олександрович Задорожній[2]

[1]аспірант кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: vladpryshchepa1@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0002-7627-0456

[2]кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій та програмної інженерії
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: zaotroy@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-3424-7293. **ResearcherID:** F-6358-2016

ПРОЕКТУВАННЯ LLM-КЕРОВАНОЇ МЕТАСИСТЕМИ ДЛЯ ДИНАМІЧНОГО АГЕНТНО-ОРІЄНТОВАНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

У роботі представлено архітектурне проєктування LLM-керованої метасистеми для агентно-орієнтованого моделювання. Підхід дозволятиме створення агентно-орієнтованих моделей і виконання симуляцій на основі природномовних специфікацій. Запропоновано три рівні використання LLM у метасистемі та шість стратегій інтеграції LLM під час виконання симуляцій. Описано підходи до валідації й оцінювання якості моделей, а також проаналізовано напрями застосування, обмеження та виклики практичного впровадження.

Ключові слова: *агентно-орієнтоване моделювання; велика мовна модель; LLM; метасистема; мова програмування Go; мікросервісна архітектура; Java-технології; якість моделі; валідація симуляції.*

Рис.: 3. Табл.: 2. Бібл.: 23.

Актуальність теми дослідження. Протягом останніх трьох десятиліть агентно-орієнтоване моделювання (Agent-Based Modeling, ABM) еволюціонувало від периферійного методологічного інструменту до визнаної дослідницької практики у широкому спектрі наукових дисциплін [1]. Bonabeau [1] характеризує ABM як підхід, за якого система концептуалізується як колекція автономних об'єктів, здатних до прийняття рішень. Проте традиційні підходи до побудови агентно-орієнтованих моделей потребують значних компетенцій у програмуванні та глибокого розуміння симуляційних фреймворків, що створює суттєві перешкоди для дослідників. Останні можуть володіти експертними знаннями про системи, які підлягають моделюванню, однак відчувають брак технічних навичок для практичної реалізації симуляцій.

Водночас розвиток великих мовних моделей (Large Language Models, LLM) демонструє вражаючі можливості у розумінні природної мови, генерації коду та міркуванні [2; 3]. Наприклад, за даними Raschka [4], GPT-4, який навчений на основі 13 трильйонів токенів, має 1,8 трильйона параметрів, що дозволяє обробляти контексти обсягом до 32 768 токенів. Такі характеристики відкривають перспективи для інтеграції LLM у системи агентно-орієнтованого моделювання та потенційного спрощення доступу до симуляційних технологій.

Незважаючи на це, наявні дослідження зосереджуються переважно на використанні LLM для аналізу результатів симуляцій або генерації окремих компонентів моделей [5; 6], залишаючи поза увагою питання створення повноцінних метасистем, здатних до комплексної інтеграції LLM на всіх етапах симуляційного процесу.

Постановка проблеми. Центральна проблематика дослідження полягає у створенні метасистеми для агентно-орієнтованого моделювання, здатної суттєво спростити процес розробки, виконання та аналізу симуляційних моделей. Насамперед така система має забезпечувати можливість специфікації моделей природною мовою: дослідники повинні мати змогу описувати структуру моделі, типи агентів, їхню поведінку та характеристики середовища у формі діалогу з системою, без необхідності програмування. Це передбачає побудову схем агентів, правил поведінки, механізмів взаємодії та параметрів середовища симуляції, які можуть бути безпосередньо використані ядром агентно-орієнтованого моделювання. Зазначене зумовлює потребу в інтелектуальному шару інтерпретації, здатному узгоджувати семантику природної мови з формальними представленнями моделей.

© В. О. Прищепа, А. О. Задорожній, 2026

Наступною складовою проблеми є інтеграція великих мовних моделей безпосередньо в цикл виконання симуляції. У такому підході LLM виступає не лише інструментом попередньої генерації моделі, а й компонентом прийняття рішень агентами в реальному часі, що дає змогу моделювати складні, контекстно залежні та адаптивні форми поведінки, які важко формалізувати за допомогою жорстко заданих правил.

Окремої уваги потребує проблема ефективності та масштабованості. Метасистема має підтримувати симуляції з тисячами й десятками тисяч агентів, поєднуючи LLM-керовану поведінку з традиційними механізмами, а також забезпечувати збереження великих обсягів симуляційних даних і надання інструментів для їх подальшого аналізу, візуалізації та прийняття рішень.

Наявні агентно-орієнтовані фреймворки, такі як NetLogo, MASON та Repast, орієнтовані переважно на ручне програмування моделей і не підтримують природномовну специфікацію, автоматичну генерацію структур моделі та інтеграцію великих мовних моделей у цикл виконання симуляцій. У результаті дослідники змушені поєднувати різнорідні інструменти та підходи, що ускладнює розробку моделей, обмежує їхню адаптивність і знижує відтворюваність результатів.

Таким чином, відсутність цілісної системи, що поєднувала б природномовну специфікацію моделей, автоматизовану побудову агентно-орієнтованих структур, інтелектуальне виконання симуляцій і масштабовану обробку результатів, зумовлює необхідність розробки нових підходів до створення та використання агентно-орієнтованих симуляційних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Bonabeau [1] визначає ABM як підхід, у якому система моделюється як колекція автономних об’єктів, що приймають рішення, названих агентами. Кожен агент індивідуально оцінює свою ситуацію та приймає рішення на основі набору правил. Macal і North [7] деталізують цю концепцію, підкреслюючи, що більшість агентно-орієнтованих моделей складається з численних агентів, специфікованих на різних масштабах, евристик прийняття рішень, правил навчання або адаптивних процесів, топології взаємодії та середовища.

Застосування ABM охоплює різноманітні наукові домени. В епідеміології цей підхід використовується для моделювання поширення захворювань на основі індивідуальних контактів [8]. Екологія застосовує ABM для моделювання взаємодій «хижак-жертва» та конкуренції за ресурси [9]. Соціальні науки звертаються до ABM для вивчення динаміки думок та поширення інформації [10]. Grimm et al. [9] наголошують на важливості патерн-орієнтованого підходу в контексті ABM, що дозволяє зіставляти результати симуляцій з емпіричними патернами.

Архітектура трансформерів, на якій базуються сучасні LLM, використовує механізм уваги (attention mechanism), що дозволяє моделі обробляти відносини між усіма елементами послідовності одночасно [11]. Vaswani et al. [11] продемонстрували революційність цього підходу для обробки природної мови. GPT-4 навчався у два етапи: спочатку на великих наборах текстових даних для передбачення наступного токена, потім застосовувалося навчання з підкріпленням від людського зворотного зв’язку (RLHF) [4].

Розвиток «reasoning» моделей у 2024 році ознаменував новий етап еволюції LLM. Ці моделі навчені генерувати покрокову аналітику перед створенням фінальних відповідей, що забезпечує кращі результати на складних задачах у математиці, програмуванні та логіці [12]. Це особливо релевантно для агентно-орієнтованого моделювання, де прийняття рішень агентами може потребувати складного міркування.

Інтеграція LLM та ABM є відносно новим напрямом досліджень, що переживає активний розвиток. Park et al. [6] представили концепцію «Generative Agents», де LLM керують поведінкою агентів у віртуальному середовищі. Водночас їхня система радше демонструє можливості окремих LLM-керованих агентів у специфічному контексті.

Wu et al. [13] запропонували концепцію Smart Agent-Based Modeling (SABM), яка інтегрує LLM у ABM для моделювання реальних сценаріїв. Дослідники зазначають, що традиційні ABM постають перед труднощами при формалізації природномовних інструкцій та здорового глузду в математичних рівняннях чи правилах. SABM демонструє ефективність через три дослідницькі кейси з відкритим вихідним кодом на GitHub, проте питання масштабованості залишається відкритим.

Chopra et al. [14] звертаються до фундаментальної проблеми масштабованості LLM-керованих ABM, представляючи методологію LLM архетипів. Їхній підхід балансує поведінкову складність з обчислювальною ефективністю. У дослідженні симулюється 8,4 мільйона агентів, що представляють Нью-Йорк під час пандемії COVID-19, демонструючи можливість застосування LLM до великомасштабних симуляцій. Ця робота підтверджує, що концепція архетипів може бути ключовою для досягнення масштабованості в LLM-керованих ABM, хоча автори визнають певні обмеження у виразності поведінки індивідуальних агентів.

Chen et al. [5] розглядали використання LLM для генерації правил поведінки агентів, однак виконання симуляції відбувалося без участі LLM, що обмежує адаптивність агентів під час виконання. Avola et al. [15] досліджували використання машинного навчання для виявлення аномалій у відеопотоках з безпілотних літальних апаратів.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Критичний аналіз наукових публікацій свідчить про наявність низки суттєвих прогалин у сучасних підходах до використання великих мовних моделей в агентно-орієнтованому моделюванні. Насамперед у наявних дослідженнях відсутні метасистеми, здатні забезпечити повноцінне створення агентно-орієнтованих моделей на основі природномовної специфікації. Запропоновані підходи, як правило, обмежуються автоматизацією окремих етапів моделювання або потребують значної участі програміста під час формалізації структури моделі та логіки поведінки агентів.

Недостатньо дослідженою проблемою залишається інтеграція великих мовних моделей безпосередньо в цикл виконання симуляції. У більшості попередніх робіт LLM використовуються переважно як інструмент генерації або постобробки, тоді як їх застосування для прийняття рішень агентами в реальному часі під час симуляції практично не досліджувалося. Такий підхід суттєво обмежує можливості моделювання адаптивної поведінки агентів та їх реакції на емерджентні ситуації, що виникають у динамічному середовищі.

Крім того, відсутні систематичні дослідження компромісів між різними підходами до використання LLM у симуляціях (індивідуальний/колективний контроль, повний контроль/тільки рішення). Wu et al. [13] та Chopra et al. [14] запропонували окремі стратегії, проте комплексне порівняння та можливість гнучкого вибору стратегії в межах однієї системи не розглядалися.

Недостатньо розробленими також залишаються архітектурні патерни побудови високопродуктивних симуляційних систем з інтеграцією LLM. Зокрема, потребують подальшого дослідження питання ефективного зберігання та обробки часових рядів, потокової передачі станів симуляції, а також управління життєвим циклом компонентів у масштабованих обчислювальних середовищах.

Нарешті, у наявних роботах приділяється недостатня увага проблемі зберігання великих обсягів симуляційних даних у системах з інтегрованими LLM, особливо з урахуванням часової структури даних та вимог до ефективного доступу для подальшого аналізу, візуалізації та підтримки прийняття рішень.

Мета дослідження. Метою дослідження є проєктування LLM-керованої метасистеми для динамічного агентно-орієнтованого моделювання. Система має забезпечувати природномовну специфікацію симуляційних моделей через діалог з LLM, автоматичну генерацію структур даних моделей (включаючи агентів, правила, взаємодії та середовище), а також механізми оцінювання якості та валідації створених моделей.

Важливим аспектом дослідження є розробка стратегій інтеграції великих мовних моделей у симуляційний процес, спрямованих на дослідження компромісів між рівнем інтелектуальності поведінки агентів і обчислювальною ефективністю системи. Передбачається реалізація декількох стратегій інтеграції LLM, що дозволятиме оцінити їхній вплив на продуктивність симуляцій, масштабованість і якість отриманих результатів.

Окрему увагу в межах дослідження приділено забезпеченню ефективного виконання симуляцій з великою кількістю агентів, підтримці потокової передачі станів симуляції в режимі реального часу, а також організації масштабованого зберігання результатів симуляцій.

Крім того, передбачається розробка інструментів для аналізу результатів з використанням LLM, що дозволить дослідникам отримувати висновки та рекомендації щодо результатів симуляцій на основі зібраних даних.

Виклад основного матеріалу. Запропоноване архітектурне рішення ґрунтується на клієнт-серверній архітектурі з чітким розмежуванням відповідальності між компонентами системи. Для реалізації клієнтської частини планується використання фреймворку Vue, який повинен забезпечити інтерактивний вебінтерфейс для природномовної специфікації моделей, налаштування параметрів симуляцій та візуалізації результатів. Серверна частина системи, на якій зосереджено основну бізнес-логіку, проєктується на основі мікросервісної архітектури [16] з використанням мови програмування Go для основного серверного додатка. Крім того, ядро системи реалізовуватиметься із застосуванням HTTP-фреймворку Echo та механізмів інверсії залежностей на основі Uber Fx [17; 18]. При цьому основний додаток виконуватиме функції створення та управління симуляційними моделями, організації діалогової взаємодії з користувачем, а також безпосереднього виконання агентно-орієнтованих симуляцій.

Взаємодія з великими мовними моделями реалізовуватиметься через окремі адаптерні мікросервіси, які дотримуватимуться уніфікованого контракту обміну даними з основним додатком та зможуть використовувати як локально розгорнуті мовні моделі, так і зовнішні LLM-платформи, зокрема OpenAI та Anthropic. Використання мікросервісного підходу забезпечуватиме ізоляцію ядра системи від специфіки конкретних реалізацій LLM, спрощуватиме масштабування та оновлення компонентів, а також дозволятиме використання різних мов програмування для створення мікросервісів без впливу на основну логіку системи.

Вибір Go для створення центрального серверного застосунку обґрунтовується високою продуктивністю для паралельних обчислень, безпекою типів та ефективним управлінням пам’яттю [19]. Водночас для реалізації LLM-адаптерних мікросервісів можуть використовуватися Java-технології, що забезпечують широкий інструментарій для побудови enterprise-рішень, зокрема розвинену екосистему бібліотек для HTTP-комунікації та обробки JSON. Загалом архітектура відповідає принципам розподілу відповідальності, у межах яких окремі модулі ізольовано реалізують інтеграцію (комунікацію) з LLM-провайдерами, управління діалогами для генерації моделей, а також збереження та виконання симуляційних процесів.

На рис. 1 представлено багаторівневу архітектуру LLM-керованої метасистеми для агентно-орієнтованого моделювання.

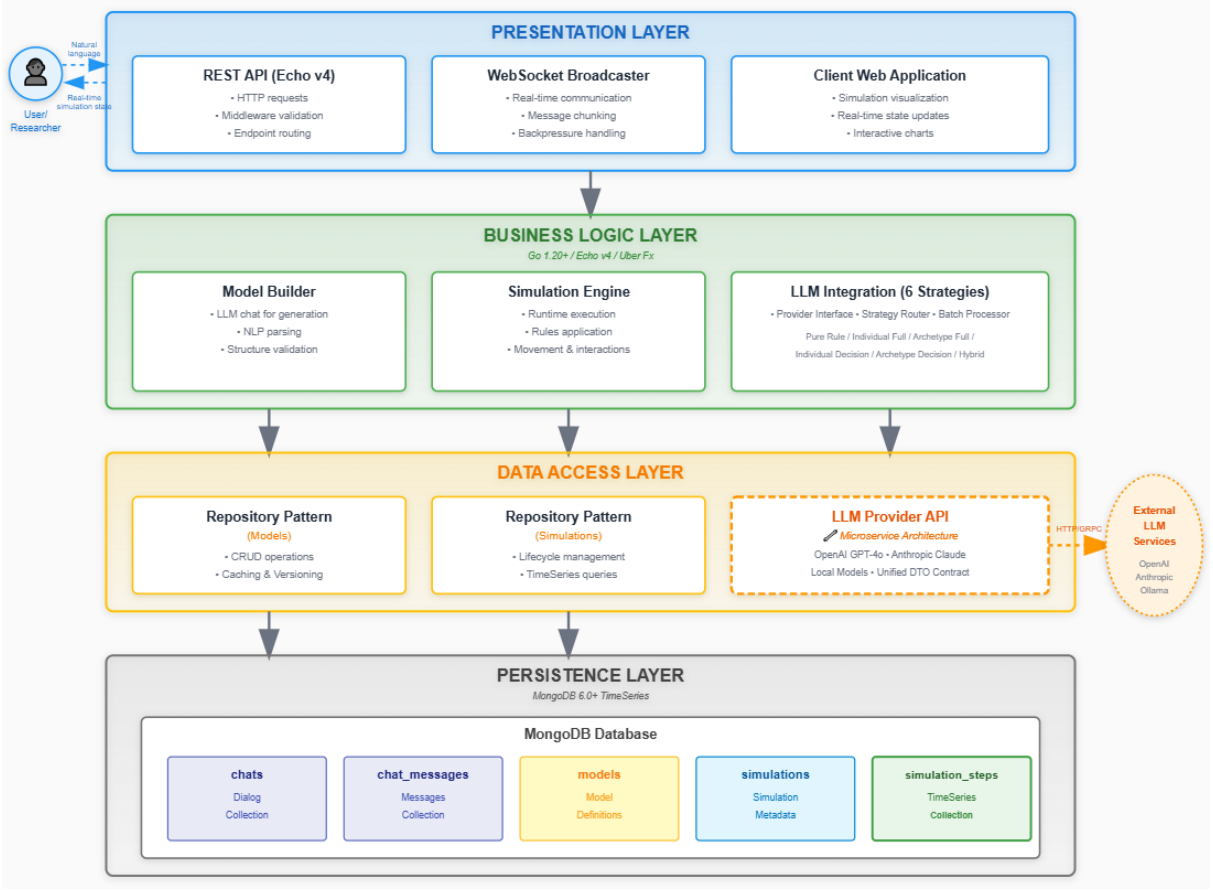


Рис. 1. Архітектура LLM-керованої метасистеми для динамічного агентно-орієнтованого моделювання

Джерело: розроблено авторами.

Технологічний стек. Вибір технологічного стеку зумовлений специфічними вимогами до продуктивності, масштабованості та ефективності розробки. У таблиці 1 міститься перелік основних технологічних рішень та коротке обґрунтування їхнього використання.

Таблиця 1 – Технологічний стек програмної реалізації системи

Компонент	*Технологія*	*Обґрунтування*
Мова	Go 1.20+	Продуктивність, конкурентність, безпека типів [19]
Web Framework	Echo v4	Легковаговий HTTP-маршрутизатор
DI	Uber/fx	Модульність, управління життєвим циклом [17]
Логування	Uber Zap	Структуроване, високопродуктивне
БД	MongoDB	Гнучка схема, колекції часових рядів [20]
WebSocket	gorilla/websocket	Комунікація в реальному часі [21]
Frontend / UI	Vue 3	Реактивний інтерфейс, компонентний підхід, швидкий розвиток

Джерело: розроблено авторами.

Архітектура взаємодії з великими мовними моделями (LLMs). Система побудована за принципом розділення відповідальності між основним серверним додатком та окремими адаптерними сервісами для взаємодії з LLM. Основний додаток відповідає за створення моделей на основі діалогів з користувачем, виконання симуляцій, управління станом агентів та збереження результатів. Взаємодія з великими мовними моделями делегується окремим мікросервісам (LLM-адаптерам), які інкапсулюють специфіку роботи з конкретними провайдерами.

Для забезпечення незалежності основного застосунку від конкретних реалізацій великих мовних моделей (LLM) було визначено уніфікований контракт обміну даними у вигляді DTO (Data Transfer Objects). Цей контракт формалізує базові операції взаємодії з LLM, зокрема підтримку діалогових сесій зі структурованими відповідями, виконання одноразових запитів із можливістю мультимодального аналізу зображень, а також завдання логічного міркування, що потребують покрокового аналітичного опрацювання. Основний застосунок взаємодіє з LLM-адаптерами виключно через визначений контракт, що забезпечує слабке зв'язування компонентів системи та дозволяє змінювати або розширювати набір провайдерів LLM без внесення змін до ядра системи.

Зазначена особливість створює передумови для реалізації LLM-адаптерних сервісів із використанням різних мов програмування відповідно до специфіки задачі та доступного програмного інструментарію. Такий підхід забезпечує технологічну гнучкість і дозволяє обирати оптимальний програмний стек для інтеграції з кожним окремим провайдером. При цьому адаптерні сервіси можуть інкапсулювати взаємодію як з локально розгорнутими мовними моделями, так і з віддаленими сервісами, доступ до яких здійснюється через програмні інтерфейси, із застосуванням найбільш доцільних засобів реалізації.

Рівні використання LLM. Інтеграція LLM реалізуватиметься на трьох концептуально різних рівнях, кожен з яких відповідає окремій фазі життєвого циклу симуляції. На рис. 2 наведено візуалізацію трьох рівнів інтеграції LLM у метасистемі.

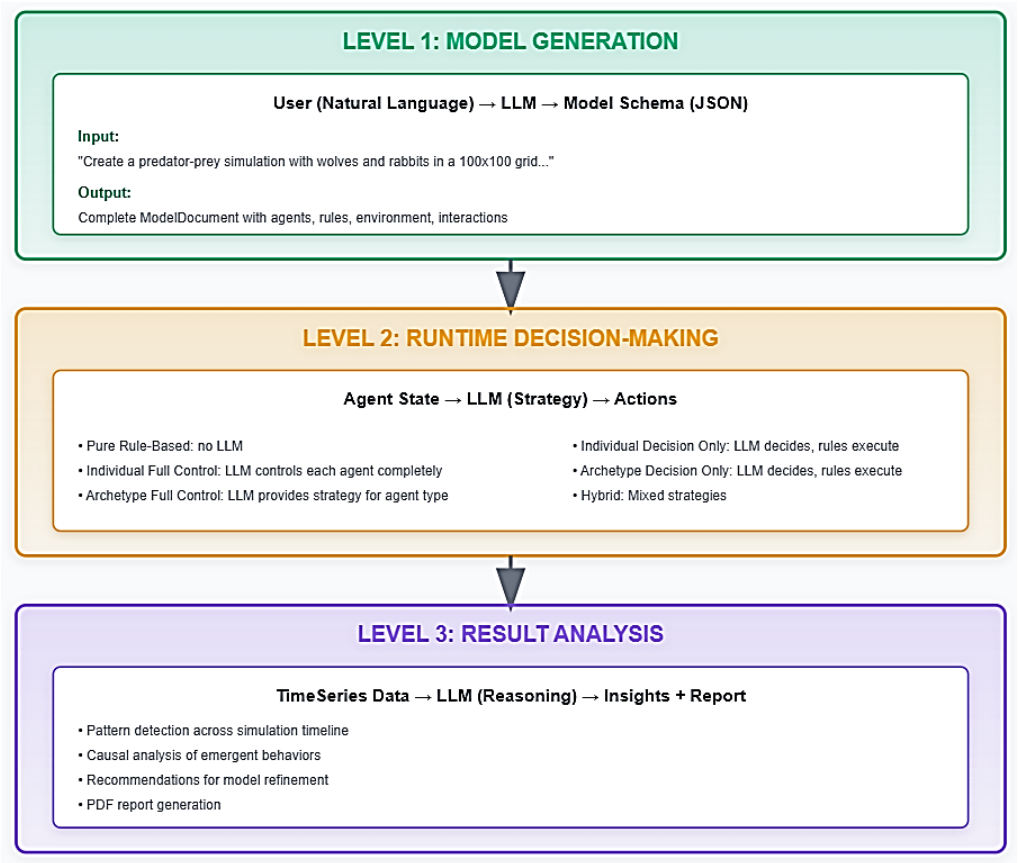


Рис. 2. Три рівні інтеграції LLM у метасистемі

Джерело: розроблено авторами.

Рівень 1 (Генерація моделей). Дослідник у діалозі з LLM описує природною мовою бажану симуляцію. LLM аналізує опис та генерує повну специфікацію моделі у структурованому форматі. Цей процес включає визначення агентів з їхніми властивостями, пра-

вила поведінки з умовами та діями, типи взаємодій між агентами та параметри середовища. Система також підтримуватиме аналіз зображень для визначення просторової структури середовища на основі візуальних схем, що дозволятиме дослідникам передавати топологічну інформацію без формальних описів.

Рівень 2 (Виконання симуляції). Під час виконання LLM інтегрується безпосередньо в цикл прийняття рішень агентів. Залежно від обраної стратегії, LLM зможе повністю контролювати поведінку кожного агента індивідуально, надавати загальні стратегії для архетипів або тільки приймати високорівневі рішення, делегуючи виконання системі правил. Це дозволятиме балансувати між виразністю поведінки та обчислювальною вартістю.

Рівень 3 (Аналіз результатів). LLM з можливостями міркування аналізуватиме результати після завершення симуляції. Система виявлятиме патерни, зв'язки та емерджентні явища, які можуть бути неочевидними при традиційному статистичному аналізі. На основі аналізу буде виконуватися генерація структурованих звітів із висновками та рекомендаціями щодо результатів симуляції.

Стратегії інтеграції LLM під час виконання симуляцій. Архітектурою системи передбачено шість стратегій керування поведінкою агентів під час виконання, які дозволяють динамічно визначати рівень участі великих мовних моделей у прийнятті рішень на кожному кроці симуляції. Визначені стратегії формують континуум від повністю детермінованої поведінки на основі правил до повноцінного LLM-керованого інтелекту, надаючи дослідникам можливість калібрувати баланс між автономністю агентів, обчислювальною ефективністю та вартістю API-викликів залежно від специфіки експерименту. У таблиці 2 наведено класифікацію стратегій інтеграції великих мовних моделей (LLM) в агентно-орієнтовану модель під час виконання симуляцій, яка відображає залежність між кількістю викликів LLM та рівнем інтелектуальності агентів, що дозволяє обирати відповідну стратегію залежно від складності поведінки агентів і обчислювальних обмежень системи.

Таблиця 2 – Стратегії інтеграції LLM під час виконання симуляцій

№	Стратегія	Кількість викликів LLM	Рівень інтелектуальності
1	Правило-орієнтована	0	Низький – LLM не використовується, поведінка агентів повністю визначається системою правил
2	Повний індивідуальний контроль	N × F	Найвищий – LLM приймає рішення та генерує конкретні дії для кожного агента на основі повного контексту
3	Повний контроль на рівні архетипу	A × F	Високий – LLM формує єдину стратегію для кожного архетипу
4	Лише індивідуальне прийняття рішень	N × F	Середній – LLM визначає високорівневі рішення для кожного агента, виконання делегується системі правил
5	Прийняття рішень на рівні архетипу	A × F	Середній – LLM визначає високорівневі рішення для архетипів, виконання делегується системі правил
6	Гібридна стратегія	Змішана	Змінний – налаштовується окремо для кожного типу агентів

де N – кількість агентів у моделі;
A – кількість архетипів агентів;
F – частота звернень до великої мовної моделі під час симуляції.
Джерело: розроблено авторами.

Запропонована таксономія стратегій розвиває ідеї Smart ABM, представлені Wu et al. [13], щодо інтеграції LLM в агентно-орієнтовану модель, та концепцію LLM архетипів від Chopra et al. [14], що використовує узагальнені профілі для групування агентів зі схожими характеристиками. На відміну від попередніх робіт, в архітектурі системи передбачено гра-

нульовану градацію стратегій із можливістю їх гібридної комбінації в межах однієї симуляції: різні групи агентів можуть керуватися різними стратегіями одночасно, що відкриває нові можливості для експериментів із гетерогенними популяціями та дослідження впливу рівня когнітивної складності окремих агентів на динаміку системи загалом.

Стратегія 1: Правило-орієнтована. LLM не використовується під час виконання симуляції. Агенти дотримуються виключно визначених правил, що забезпечує детермінованість, високу швидкість та повну відтворюваність результатів. Ця стратегія доцільна для тестування базової логіки моделі, валідації структури симуляції або коли поведінка агентів може бути повністю специфікована через формальні правила.

Стратегія 2: Повний індивідуальний контроль. LLM ухвалює всі рішення для кожного агента індивідуально, забезпечуючи повну автономію. Кожен агент отримує персоналізовані інструкції на основі свого унікального стану, позиції та локального контексту. LLM аналізує властивості агента, найближче оточення, історію з пам'яті та генерує специфічні дії.

Для оптимізації може застосовуватися пакетування LLM викликів [22], коли запити для кількох агентів групуються в один API-виклик. Це зменшує загальну латентність, хоча вартість залишається пропорційною кількості агентів. Стратегія найбільш доцільна для малих популяцій з високою складністю поведінки, де кожен агент має унікальні характеристики або контекст.

Стратегія 3: Повний контроль на рівні архетипу. LLM надаватиме єдину стратегію для всіх агентів одного типу, здійснюючи один виклик на архетип за крок симуляції. LLM аналізує агреговану статистику для всіх агентів типу, включаючи середні значення властивостей, розподіл у просторі, доступність ресурсів. Генеруватиметься загальна поведінкова стратегія, яка потім застосовуватиметься до всіх агентів цього архетипу, можливо, з варіаціями на основі локального контексту.

Вартість використання цієї стратегії є середньою та пропорційною кількості архетипів, а не агентів. Вона може бути ефективною для середніх та великих популяцій з чіткими ролями, де агенти одного типу мають подібну поведінку, але популяція достатньо велика, щоб індивідуальний контроль був непрактичним.

Стратегія 4: Лише індивідуальне прийняття рішень. LLM прийматиме високорівневі рішення для кожного агента, тоді як система правил виконуватиме їх. Це гібридний підхід, що поєднуватиме інтелект LLM з примусовим виконанням правил. Наприклад, агент отримує від LLM рішення на кшталт «шукати їжу» або «уникати хижака», а система правил транслює ці абстрактні рішення в конкретні дії (зміна напрямку руху, модифікація властивостей).

Такий підхід дозволятиме LLM зосередитися на складних аспектах прийняття рішень, делегуючи виконання ефективним правилам. Доцільний для ситуацій, де рішення є складними та контекстно залежними, але виконання може бути стандартизоване.

Стратегія 5: Прийняття рішень на рівні архетипу. Рішення високого рівня прийматися на рівні архетипу, що є найбільш ефективним підходом для масових популяцій. При цьому LLM визначає загальну стратегію для типу агентів (наприклад, «агресивний пошук»), а система правил адаптує цю стратегію до індивідуальних обставин кожного агента.

Вартість цієї стратегії є найнижчою серед стратегій з LLM-інтеграцією, пропорційна лише кількості архетипів. Стратегія дозволяє масштабувати симуляції, зберігаючи певний рівень інтелектуальної поведінки при мінімальних витратах на API-виклики.

Стратегія 6: Гібридна. Різні стратегії застосовуються для різних архетипів у межах однієї симуляції, забезпечуючи максимальну гнучкість. Налаштування стратегії здійснюється окремо для кожного типу агентів. Наприклад, лідери можуть використовувати

«Повний індивідуальний контроль» для складного прийняття рішень, основна популяція – «Прийняття рішень на рівні архетипу» для ефективності, а фонові агенти – «Правило-орієнтовану» для мінімізації вартості.

Це дозволятиме оптимізувати розподіл обчислювальних ресурсів, вкладаючи більше «інтелекту» в критичні ролі та зменшуючи вартість для менш важливих агентів. Гібридна стратегія може бути особливо корисною для мультирольових симуляцій з ієрархією або спеціалізацією, де різні типи агентів мають якісно різну важливість.

Варто зазначити, що стратегії 2 і 4 (а також 3 і 5) характеризуються однаковою кількістю викликів LLM, проте відрізняються обсягом відповідальності, делегованої моделі в кожному виклику. У стратегіях повного контролю (2 і 3) LLM приймає рішення та генерує конкретні дії агента на основі комплексного аналізу контексту, що потребує ширшого вхідного контексту та повертає більш деталізовану відповідь. Натомість у стратегіях прийняття рішень (4 і 5) LLM лише обирає стратегію поведінки під час прийняття визначених рішень, тоді як система правил транслює її в конкретні дії – це зменшує складність запиту та обсяг відповіді, однак обмежує адаптивність поведінки агентів. Таким чином, при еквівалентній кількості звернень до LLM стратегії повного контролю забезпечують вищий рівень інтелектуальності агентів завдяки більшій деталізації та контекстуальній глибині кожного виклику, тоді як стратегії прийняття рішень є обчислювально ефективнішими на рівні окремого запиту.

Модель даних. Схема даних базуватиметься на п’яти основних колекціях MongoDB, кожна з яких відповідатиме за певний аспект функціональності системи. Колекція «chats» зберігатиме історію діалогів для генерації моделей, тоді як «chat_messages» міститиме окремі повідомлення в цих діалогах. Визначення агентно-орієнтованих моделей зберігатиметься в колекції «models», метадані та стан виконання симуляцій в «simulations», а результати симуляцій – у спеціалізованій колекції часових рядів «simulation_steps».

Для зберігання історії виконання симуляцій пропонується використати спеціалізоване сховище на основі колекцій часових рядів MongoDB [20]. Цей тип колекцій забезпечує ефективне стиснення даних завдяки технології блокової обробки (block processing), що критично важливо для довготривалих симуляцій з великою кількістю агентів [20]. Використання стандартних колекцій MongoDB для зберігання таких обсягів даних може призводити до надмірного споживання дискового простору та поступової деградації продуктивності діапазонних (range) запитів, що ускладнюватиме подальший аналіз даних.

При цьому колекції часових рядів MongoDB можуть розглядатися як компромісне рішення, яке дозволяє уникнути надмірної складності інфраструктури; водночас у разі подальшого розвитку системи допустимим є перехід до спеціалізованих баз даних часових рядів, зокрема InfluxDB, Prometheus або Amazon Timestream.

Модель виконання симуляції. Виконання симуляції організовуватиметься як послідовність дискретних кроків, на кожному з яких система буде оновлювати стан всіх агентів та середовища. Цикл виконання окремого кроку реалізовуватиметься як послідовність фаз. Спочатку визначатиметься та виконуватиметься відповідна стратегія LLM. Потім для кожного агента застосовуватимуться специфічні правила згідно з їх пріоритетами. Умови правил оцінюватимуться в порядку пріоритету, і як тільки умова задовольнятиметься, виконуватимуться відповідні дії.

На наступному етапі оброблятимуться взаємодії між агентами та між ними й середовищем, а результати прийнятих рішень застосовуватимуться до просторового стану агентів шляхом оновлення їхніх позицій і швидкостей.

Під час виконання система підтримуватиме повний стан симуляції в пам'яті, включаючи колекцію агентів з властивостями та позиціями, стан середовища та індекси для швидкого доступу до агентів. Після кожного кроку система оновлюватиме пам'ять агентів та зберігатиме стан у базу даних.

Система пам'яті агентів. Кожен агент матиме обмежену пам'ять подій, що дозволятиме LLM приймати рішення на основі історичного контексту. Без пам'яті кожне рішення базуватиметься виключно на поточному стані. Пам'ять зберігатиме різні типи подій: прийняті рішення (як власні, так і отримані від LLM), взаємодії з іншими агентами (конфлікти, кооперація, обмін ресурсами), виконання правил (які правила спрацювали та чому), та відповіді від LLM (для контролю контексту).

Кожна подія міститиме дані про крок симуляції, тип події, стислий опис та детальну інформацію. Структура подій буде гнучкою та зможе включати додаткові метадані.

Архітектура потокової передачі для візуалізації симуляцій. Реалізація потокової передачі є необхідною для створення клієнтського вебдодатка, який забезпечуватиме візуалізацію процесу симуляцій у режимі реального часу, надаючи користувачам можливість спостерігати за динамікою агентів та їх взаємодіями безпосередньо під час виконання моделі. Для реалізації потокової передачі стану симуляції пропонується застосувати протокол WebSocket [21], який дозволяє двосторонню комунікацію в реальному часі. Це усуває необхідність постійного опитування (polling) сервера клієнтами, знижуючи латентність та навантаження на мережу. Архітектура базується на концепції «кімнат симуляції» [23], де кожна активна симуляція має власну кімнату з підключеними клієнтами.

На рисунку 3 представлено архітектуру потокової передачі стану симуляції.

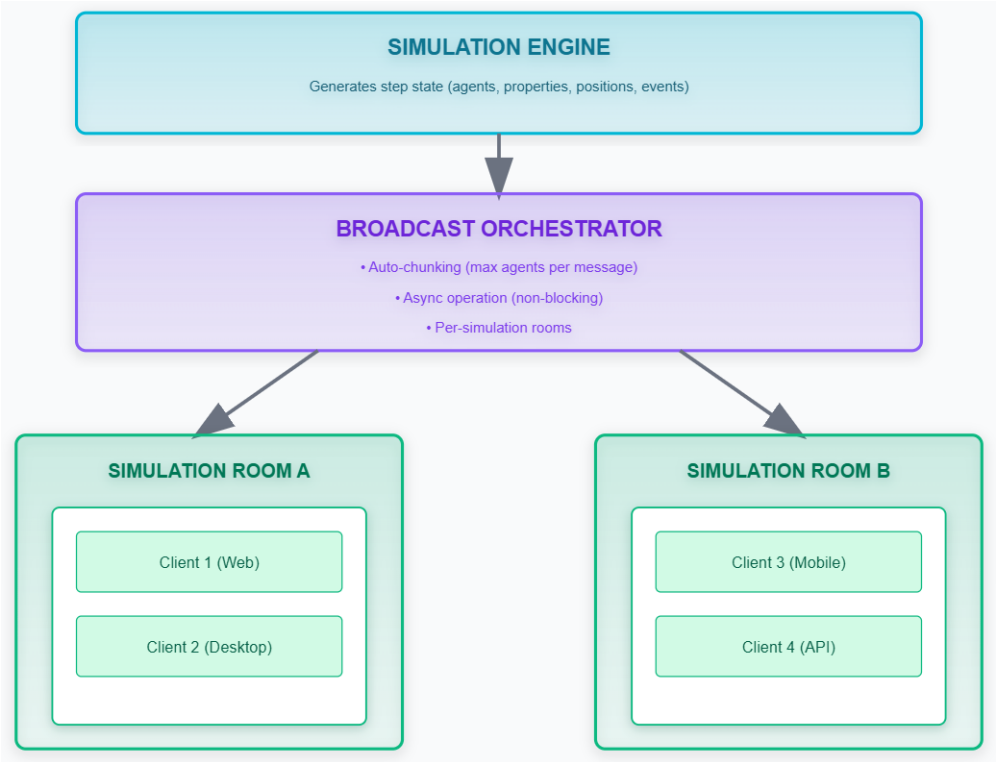


Рис. 3. Архітектура потокової передачі стану симуляції

Джерело: розроблено авторами.

Оркестратор метасистеми координуватиме розсилку оновлень та управлятиме життєвим циклом з'єднань, створюючи для кожної симуляції окрему кімнату, до якої будуть підключатися клієнти-підписники. Після кожного кроку симуляції оркестратор отримуватиме стан симуляції та розсилатиме його всім активним підписникам кімнати.

Трансляція WebSocket-повідомлень виконуватиметься у фонових горутинах без блокування основного циклу симуляції. Для великих кроків з тисячами агентів стан автоматично розділятиметься на фрагменти (chunks) для запобігання перевантаженню каналів. Клієнт отримуватиме дані про порядок фрагментів та матиме можливість відповідно їх обробити.

Аналіз результатів симуляцій. Після завершення симуляції система надаватиме можливість аналізу результатів з використанням LLM у режимі міркування (reasoning). На відміну від традиційного статистичного аналізу, який обмежується обчисленням агрегатних метрик, застосування великих мовних моделей дозволятиме виявляти складні патерни, каузальні зв’язки та емерджентні явища, що виникають із взаємодії агентів під час симуляцій.

Використання LLM у режимі міркування дозволятиме не лише фіксувати кількісні показники, а й інтерпретувати їх у контексті поведінки агентів, виявляти приховані закономірності та встановлювати причинно-наслідкові зв'язки між подіями в системі.

За результатами аналізу система забезпечуватиме можливість генерації структурованих PDF-звітів для документування результатів. Такі звіти інтегруватимуть як кількісні метрики, так і результати аналізу, отримані за допомогою LLM.

Потенційні напрями застосування. Спроектована метасистема має широкий спектр потенційних застосувань у наукових та прикладних доменах, де агентно-орієнтоване моделювання традиційно вимагає значних технічних компетенцій. Природномовна специфікація моделей та гнучкі стратегії інтеграції LLM роблять систему особливо цінною для міждисциплінарних досліджень, де експерти зможуть безпосередньо формалізувати свої знання без залучення програмістів.

Одним із базових напрямів застосування має стати освіта, оскільки метасистема знижує поріг входу та скорочує час створення моделей. Завдяки цьому студенти різних спеціальностей, у тому числі нетехнічних, зможуть експериментувати з моделями у своїх предметних областях без необхідності глибокого занурення в технічні аспекти реалізації. Це може значно прискорити засвоєння концепцій складних систем та емерджентної поведінки.

Управління надзвичайними ситуаціями становить критично важливу область застосування. Під час кризових подій (природні катастрофи, техногенні аварії, пандемії) оперативне прийняття рішень вимагає швидкого моделювання можливих сценаріїв розвитку ситуації. Традиційні підходи до створення симуляцій є занадто повільними для реагування в реальному часі. Метасистема надаватиме можливість фахівцям служб надзвичайних ситуацій описати поточну обстановку природною мовою («евакуація 50 000 мешканців прибережної зони при загрозі циклону»), а LLM автоматично згенерує модель з різними типами агентів (цивільні особи з різною мобільністю, рятувальники, транспортні засоби), правилами поведінки (паніка, допомога іншим, пошук укриття) та інфраструктурними обмеженнями.

Концепція Smart City представляє ще один перспективний напрям застосування. Урбанізація створює складні виклики для планування міст, управління транспортними потоками, оптимізації енергоспоживання та реагування на міські кризи. Як продемонстрували Chopra et al. [14], LLM-керовані ABM можуть симулювати мільйони мешканців з реалістичною поведінкою. Проєктована метасистема розширюватиме ці можливості, дозволяючи муніципальним планувальникам самостійно створювати та модифікувати симуляції без програмування.

Конкретні сценарії Smart City застосувань можуть включати: моделювання впливу нової транспортної інфраструктури (метро, велодоріжки, BRT системи) на мобільність мешканців; оптимізацію розташування публічних сервісів (лікарні, школи, парки) з урахуванням демографічних патернів; аналіз поширення епідемій у міському середовищі з урахуванням транспортних потоків та соціальних контактів.

Існує багато інших перспективних напрямів застосування, зокрема епідеміологічне моделювання, економічні та фінансові системи, екологія й соціальні науки, де природномовна специфікація може суттєво прискорити розробку ABM. Система дозволятиме швидко описувати інтервенції та характеристики популяцій для аналізу поширення інфекцій, задавати структуру ринків і поведінкові особливості учасників для відтворення колективних ефектів, формалізувати екологічні взаємодії та адаптацію видів до змін середовища, а також моделювати соціальну динаміку (дезінформація, громадська думка, протести, міграція) з урахуванням контекстної комунікації агентів.

Варто підкреслити, що універсальність запропонованої метасистеми є складною метою та неминуче передбачатиме компроміси. У зв'язку з цим повне покриття всіх доменів і сценаріїв не може бути гарантоване, адже окремі сценарії використання вимагатимуть доменно-специфічної адаптації або розширення функціональності та залишатимуться поза межами застосовності метасистеми.

Оцінювання якості та валідація моделей. Автоматична генерація агентно-орієнтованих моделей на основі природномовних описів ставить перед розробниками нетривіальне завдання забезпечення їхньої коректності. На відміну від традиційного підходу, де дослідник безпосередньо контролює кожен аспект специфікації, LLM-керована генерація вносить елемент невизначеності: модель може бути синтаксично коректною, проте семантично не відповідати намірам користувача. Це зумовлює необхідність багаторівневої валідації на етапі реалізації системи.

Першим кроком є структурна валідація, що охоплює перевірку синтаксичної коректності згенерованих специфікацій агентів, правил та взаємодій. На цьому етапі виявляються типові помилки генерації: невідповідність типів даних, відсутність обов'язкових атрибутів, порушення логічної узгодженості між компонентами моделі. Структурна валідація реалізується як автоматизований тестовий етап і дозволяє відсіяти некоректні моделі ще до спроби їх виконання.

Значно складнішим є питання поведінкової валідації. Grimm et al. [9] обґрунтували важливість патерн-орієнтованого підходу для забезпечення реалістичності агентно-орієнтованих моделей, де результати симуляцій зіставляються з емпіричними патернами реальних систем. У межах розробки метасистеми цей підхід передбачає створення референтних тестових наборів із заздалегідь відомими очікуваними патернами – характерними розподілами популяцій, динамікою взаємодій, просторовим групуванням агентів. Такі набори уможливлюють регресійне тестування під час модифікації алгоритмів генерації та виявлення систематичних відхилень у поведінці згенерованих моделей.

Окремої уваги заслуговує семантична валідація – оцінка відповідності згенерованої моделі початковому природномовному опису. Цей рівень валідації є найбільш проблематичним, оскільки потребує розуміння намірів дослідника та експертних оцінок предметних спеціалістів.

Для кількісного оцінювання якості доцільно використовувати набір метрик: повноту специфікації, що відображає охоплення моделлю всіх аспектів природномовного запиту; узгодженість поведінки під час повторних запусків з ідентичними параметрами; каліброваність результатів щодо емпіричних даних або експертних очікувань; а також збереження реалістичності при масштабуванні кількості агентів.

Обмеження та виклики запропонованого підходу. Незважаючи на описані можливості, запропонована архітектура має низку обмежень, що визначають межі її застосовності.

Система проєктується для дискретних агентно-орієнтованих моделей і не призначена для континуальних процесів, що вимагають диференціальних рівнянь. Гібридні моделі, де деякі компоненти описуються ODEs (ordinary differential equations), а інші – агентами, потребують нетривіальної адаптації архітектури. Крім того, симуляції з

критичними вимогами до продуктивності реального часу (наприклад, системи з апаратним включенням у контур (HIL) для робототехніки) можуть зазнавати негативного впливу від непередбачуваної латентності LLM API-викликів, що робить систему непридатною для застосувань із жорсткими вимогами реального часу.

Фізично-орієнтовані симуляції зі складною просторовою динамікою (гідродинаміка, деформація матеріалів) також виходять за межі можливостей системи, оскільки вона не інтегрує спеціалізовані чисельні методи. Симуляції, що потребують суворої верифікації та сертифікації (аерокосмічна галузь, ядерна енергетика), можуть бути обмежені недетермінованістю LLM та труднощами формальної валідації згенерованих моделей.

Окремим суттєвим викликом є економіка використання комерційних LLM API. Вартість викликів формується на основі кількості оброблених токенів, причому генерація відповідей (вихідні токени) зазвичай коштує у три-чотири рази дорожче за обробку запитів. Для ілюстрації масштабу проблеми розглянемо симуляцію з 1000 агентів протягом 10 000 кроків при використанні стратегії «Повний індивідуальний контроль» з частотою LLM-викликів кожні 10 кроків. За таких параметрів система генерує близько мільйона запитів, кожен з яких передбачає обробку кількасот токенів. Сукупний обсяг може сягати сотень мільйонів токенів, що при поточних тарифах провідних комерційних моделей означатиме витрати значних обсягів коштів за одну симуляцію. Для дослідницьких проєктів такі витрати швидко стають неприйнятними.

Стратегія на основі архетипів частково пом'якшує цю проблему, зменшуючи кількість викликів пропорційно до числа типів агентів замість загальної популяції. Однак для моделей з десятками різних архетипів економія може виявитися недостатньою. Альтернативою є використання локально розгорнутих моделей (Llama 3, Mistral та інші), проте їхня якість міркування та виконання запитів поступається передовим комерційним рішенням. Це може негативно позначитися на коректності згенерованих моделей та адекватності поведінки агентів. Крім того, розгортання локальних моделей вимагає значних обчислювальних ресурсів (GPU з 24+ GB VRAM для ефективного інференсу), що переносить вартість з операційних витрат на капітальні.

Не менш важливим є ризик хибної інтерпретації природномовних описів. Попри вражаючі можливості сучасних LLM у розумінні природної мови, вони залишаються схильними до помилок, особливо в доменно-специфічних контекстах. Амбівалентні або недостатньо деталізовані описи можуть призвести до генерації моделей, що не відповідають намірам дослідника. Наприклад, формулювання «агенти конкурують за ресурси» допускає інтерпретацію як прямої агресивної конкуренції, так і непрямої – через споживання обмежених ресурсів, що веде до якісно різних динамік системи.

Також проблематичним є феномен «впевненої некомпетентності» LLM: модель може згенерувати синтаксично бездоганну, проте семантично абсурдну специфікацію, якщо опис виходить за межі її тренувальних даних. Для нішевих наукових доменів зі специфічною термінологією цей ризик є особливо високим і потребує ретельної експертної валідації результатів генерації.

Висновки. У статті представлено проєктування LLM-керованої метасистеми для динамічного агентно-орієнтованого моделювання. Архітектура базується на клієнт-серверному підході з мікросервісною організацією серверної частини, що забезпечуватиме модульність, масштабованість та гнучкість системи.

Запропоновано трирівневу концепцію інтеграції великих мовних моделей у агентно-орієнтоване моделювання, яка охоплює генерацію моделей на основі природномовної специфікації, керування поведінкою агентів під час виконання симуляції та аналіз результатів із застосуванням LLM у режимі міркування.

Концептуалізовано шість стратегій інтеграції LLM під час виконання симуляцій: від повністю правило-орієнтованої до повного індивідуального контролю, з проміжними варіантами на рівні архетипів та гібридним підходом. Стратегії формують континуум з різними компромісами між інтелектуальністю поведінки агентів, обчислювальною вартістю та масштабованістю системи.

Обґрунтовано архітектурні рішення для проєктування високопродуктивної симуляційної системи. Спроєктовано мікросервісну архітектуру, де основний серверний додаток буде реалізовано на основі мови Go із використанням фреймворку Echo та механізму інверсії залежностей Uber Fx. Клієнтська частина передбачає застосування Vue.js для природномовної специфікації моделей, налаштування параметрів симуляцій та візуалізації результатів. Взаємодія з великими мовними моделями передбачається через окремі адаптерні мікросервіси, що дотримуються уніфікованого контракту обміну даними з основним додатком і можуть використовувати як локальні, так і зовнішні LLM-платформи. Спроєктовано структуру зберігання симуляційних даних у колекціях часових рядів та запропоновано архітектуру потокової передачі стану симуляції на основі протоколу WebSocket.

Визначено підходи до оцінювання якості та валідації автоматично згенерованих моделей на трьох рівнях: структурна, поведінкова та семантична валідація.

Практичне значення отриманих результатів полягає у потенційному зниженні бар'єра входу в агентно-орієнтоване моделювання для дослідників без глибоких програмістських навичок. Визначено напрями застосування системи в освіті, управлінні надзвичайними ситуаціями, концепції Smart City, епідеміологічному моделюванні, економічних та екологічних дослідженнях.

Виявлено обмеження підходу, зокрема непридатність для континуальних процесів з диференціальними рівняннями, систем реального часу з жорсткими обмеженнями та фізично-орієнтованих симуляцій. Також визначено економічні виклики використання комерційних LLM API та ризики хибної інтерпретації природномовних описів.

Перспективи подальших досліджень насамперед пов'язані з реалізацією спроєктованої метасистеми та її експериментальною перевіркою на прикладних сценаріях. Важливим є прискорення та масштабування симуляцій, зокрема через розробку окремого сервісу виконання симуляцій, що дозволятиме підвищувати продуктивність шляхом горизонтального масштабування, зменшувати час обчислень та підтримувати більші популяції агентів. Значним напрямом є також інтеграція з локальними великими мовними моделями для зменшення залежності від комерційних API та розробка або донавчання спеціалізованих моделей для задач агентно-орієнтованого моделювання з метою забезпечення стабільності поведінки агентів і відтворюваності результатів.

Спроектована система відкриває нові можливості для інтеграції сучасних LLM у агентно-орієнтоване моделювання, потенційно трансформуючи процес створення та аналізу симуляцій у широкому спектрі наукових дисциплін.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті

Під час написання цього матеріалу автори використовували ChatGPT та Claude AI для покращення читабельності, виправлення стилістичних і граматичних помилок, а також для форматування використаних джерел. Після використання цих інструментів автори переглянули та відредагували зміст за потреби і взяли на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Bonabeau, E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 99*(Supplement 3), 7280–7287. https://doi.org/10.1073/pnas.082080899.

2. Achiam, J., Adler, S., Agarwal, S., Ahmad, L., Akkaya, I., Aleman, F. L., … Zaremba, W. (2023). *GPT-4 technical report*. arXiv. https://arxiv.org/abs/2303.08774.

3. OpenAI. (2024). *Hello GPT-4o*. https://openai.com/index/hello-gpt-4o /.

4. Raschka, S. (2025). *The state of LLMs 2025: Progress, progress, and predictions*. Sebastian Raschka's Magazine. https://magazine.sebastianraschka.com/p/state-of-llms-2025

5. Chen, W., et al. (2024). *Large language models for generating rules, yay or nay?* arXiv. https://arxiv.org/abs/2406.06835.

6. Park, J. S., O'Brien, J. C., Cai, C. J., Morris, M. R., Liang, P., & Bernstein, M. S. (2023). Generative agents: Interactive simulacra of human behavior. *Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, 1–22*. https://doi.org/10.1145/3586183.3606763.

7. Macal, C. M., & North, M. J. (2010). Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Journal of Simulation, 4*(3), 151–162. https://doi.org/10.1057/jos.2010.3

8. Ferguson, N. M., et al. (2020). *Report 9: Impact of non-pharmaceutical interventions (NPIs) to reduce COVID-19 mortality and healthcare demand*. Imperial College London. https://doi.org/10.25561/77482.

9. Grimm, V. (2005). Pattern-Oriented modeling of agent-based complex systems: Lessons from ecology. *Science, 310*(5750), 987–991. https://doi.org/10.1126/science.1116681

10. Castellano, C., Fortunato, S., & Loreto, V. (2009). Statistical physics of social dynamics. *Reviews of Modern Physics, 81*(2), 591-646. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.81.591

11. Vaswani, A., et al. (2017). Attention is all you need. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30, 5998–6008. https://proceedings.neurips.cc/paper/2017/hash/3f5ee243547dee91fbd053c1c4a845aa-Abstract.html.

12. OpenAI. (2024). *Learning to reason with LLMs*. https://openai.com/index/learning-to-reason-with-llms/.

13. Wu, Z., et al. (2023). *Smart agent-based modeling: On the use of large language models in computer simulations*. arXiv. https://arxiv.org/abs/2311.06330.

14. Chopra, A., Kumar, S., Giray-Kuru, N., Raskar, R., & Quera-Bofarull, A. (2024). On the limits of agency in agent-based models. *Proceedings of the 24th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS)*. arXiv. https://arxiv.org/abs/2409.10568.

15. Avola, D., Cinque, L., Di Mambro, A., Diko, A., Fagioli, A., Foresti, G. L., Marini, M. R., Mecca, A., & Pannone, D. (2022). Low-altitude aerial video surveillance via one-class SVM anomaly detection from textural features in UAV images. *Information*, 13(1), 2. https://doi.org/10.3390/info13010002

16. Newman, S. (2021). *Building microservices: Designing fine-grained systems* (2nd ed.). O'Reilly Media.

17. Uber Technologies. (2024). *Fx: A dependency injection based application framework for Go* [Computer software]. GitHub. https://github.com/uber-go/fx.

18. Code-B. (2024). *The best programming languages for microservices in 2024*. Code-B Blog. https://code-b.dev/blog/best-languages-for-microservices.

19. Cortex. (2023). *A guide to Golang microservices*. Cortex Blog. https://www.cortex.io/post/golang-microservices.

20. Palmer, R. (2024). *Supercharging time series collections: Key enhancements in MongoDB 8.0 with block processing*. MongoDB. https://www.mongodb.com/company/blog/technical/key-enhancements-mongodb-8-0-block-processing.

21. Pimentel, V., & Nickerson, B. G. (2012). Communicating and displaying real-time data with WebSocket. *IEEE Internet Computing*, 16(4), 45–53. https://doi.org/10.1109/MIC.2012.64.

22. Yu, G., Jeong, J. S., Kim, G., Kim, S., & Chun, B. (2022). Orca: A distributed serving system for transformer-based generative models. *Proceedings of the 16th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI '22)*, 521–538.

23. Fette, I., & Melnikov, A. (2011). *The WebSocket protocol* (RFC 6455). Internet Engineering Task Force (IETF). https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc6455.

References

1. Bonabeau, E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 99*(suppl_3), 7280-7287. https://doi.org/10.1073/pnas.082080899.

2. Achiam, J., et al. (2023). GPT-4 Technical Report. *arXiv preprint arXiv:2303.08774*. https://arxiv.org/abs/2303.08774.

3. OpenAI. (2024). Hello GPT-4o. https://openai.com/index/hello-gpt-4o/.

4. Raschka, S. (2025). The State Of LLMs 2025: Progress, Progress, and Predictions. *Sebastian Raschka's Magazine*. https://magazine.sebastianraschka.com/p/state-of-llms-2025.

5. Chen, W., et al. (2024). Large language models for generating rules, yay or nay? *arXiv preprint arXiv:2406.06835*. https://arxiv.org/abs/2406.06835.

6. Park, J. S., O'Brien, J. C., Cai, C. J., Morris, M. R., Liang, P., & Bernstein, M. S. (2023). Generative agents: Interactive simulacra of human behavior. *Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 1-22. https://doi.org/10.1145/3586183.3606763.

7. Macal, C. M., & North, M. J. (2010). Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Journal of Simulation*, 4(3), 151-162. https://doi.org/10.1057/jos.2010.3.

8. Ferguson, N. M., et al. (2020). Report 9: Impact of non-pharmaceutical interventions (NPIs) to reduce COVID-19 mortality and healthcare demand. Imperial College London. https://doi.org/10.25561/77482.

9. Grimm, V., et al. (2005). Pattern-oriented modeling of agent-based complex systems: lessons from ecology. *Science, 310*(5750), 987-991. https://doi.org/10.1126/science.1116681.

10. Castellano, C., Fortunato, S., & Loreto, V. (2009). Statistical physics of social dynamics. *Reviews of Modern Physics, 81*(2), 591-646. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.81.591.

11. Vaswani, A., et al. (2017). Attention is all you need. *Advances in Neural Information Processing Systems, 30*, 5998-6008. https://proceedings.neurips.cc/paper/2017/hash/3f5ee243547dee91fbd053c1c4a845aa-Abstract.html.

12. OpenAI. (2024). Learning to Reason with LLMs. OpenAI Blog. https://openai.com/index/learning-to-reason-with-llms/.

13. Wu, Z., et al. (2023). Smart Agent-Based Modeling: On the Use of Large Language Models in Computer Simulations. *arXiv preprint arXiv:2311.06330*. https://arxiv.org/abs/2311.06330.

14. Chopra, A., Kumar, S., Giray-Kuru, N., Raskar, R., & Quera-Bofarull, A. (2024). On the limits of agency in agent-based models. *Proceedings of the 24th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2025). arXiv preprint arXiv:2409.10568*. https://arxiv.org/abs/2409.10568.

15. Avola, D., Cinque, L., Di Mambro, A., Diko, A., Fagioli, A., Foresti, G. L., Marini, M. R., Mecca, A., & Pannone, D. (2022). Low-Altitude Aerial Video Surveillance via One-Class SVM Anomaly Detection from Textural Features in UAV Images. *Information, 13*(1), 2. https://doi.org/10.3390/info13010002.

16. Newman, S. (2021). *Building Microservices: Designing Fine-Grained Systems* (2nd ed.). O'Reilly Media.

17. Uber Technologies. (2024). Fx: A dependency injection based application framework for Go. GitHub. https://github.com/uber-go/fx.

18. Code-B. (2024). The Best Programming Languages for Microservices in 2024. Code-B Blog. https://code-b.dev/blog/best-languages-for-microservices.

19. Cortex. (2023). A guide to Golang microservices. Cortex Blog. https://www.cortex.io/post/golang-microservices.

20. Palmer, R. (2024). Supercharging time series collections: Key enhancements in MongoDB 8.0 with block processing. MongoDB. https://www.mongodb.com/company/blog/technical/key-enhancements-mongodb-8-0-block-processing.

21. Pimentel, V., & Nickerson, B. G. (2012). Communicating and Displaying Real-Time Data with WebSocket. *IEEE Internet Computing, 16*(4), 45-53. https://doi.org/10.1109/MIC.2012.64.

22. Yu, G., Jeong, J. S., Kim, G., Kim, S., & Chun, B. (2022). Orca: A Distributed Serving System for Transformer-Based Generative Models. *Proceedings of the 16th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI '22)*, 521-538.

23. Fette, I., & Melnikov, A. (2011). The WebSocket Protocol. RFC 6455, Internet Engineering Task Force (IETF). https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc6455.

Дата першого надходження статті до видання: 13.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 02.01.2026

UDC 004.94:004.8

Vladyslav Pryshchepa[1], Artem Zadorozhnii[2]

[1]PhD Student of the Department of Information and Computer Systems
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: vladpryshchepa1@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0002-7627-0456

[2]PhD inTechnical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Technology and Software Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: zaotroy@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-3424-7293. **ResearcherID:** F-6358-2016

DESIGN OF LLM-DRIVEN META-SYSTEM FOR DYNAMIC AGENT-ORIENTED MODELING

Over the past three decades, agent-based modeling (ABM) has evolved from a peripheral methodological tool into a recognized research practice across a wide spectrum of scientific disciplines. However, traditional approaches to building agent-based models require significant programming competencies and a deep understanding of simulation frameworks, creating substantial barriers for domain researchers who possess expert knowledge about the systems being modeled but lack the technical skills for practical implementation. The development of large language models (LLMs) has demonstrated impressive capabilities in natural language understanding, code generation, and reasoning, opening perspectives for integrating LLMs into agent-based modeling systems and potentially democratizing access to simulation technologies.

The central problem addressed in this research is the creation of a meta-system for agent-based modeling capable of significantly simplifying the development, execution, and analysis of simulation models of complex socio-technical and natural systems. Such a system must enable natural language model specification, LLM integration directly into the simulation execution cycle, and support simulations with thousands of agents while combining LLM-driven behavior with computationally efficient mechanisms. Existing ABM frameworks such as NetLogo, MASON, and Repast are primarily oriented toward manual model programming and do not support natural language specification, automatic model structure generation, or LLM integration into the simulation execution cycle.

The objective of this research is to design an LLM-driven meta-system for dynamic agent-based modeling that provides natural language specification of simulation models through dialogue with LLM, automatic generation of model data structures including agents, rules, interactions, and environment, as well as mechanisms for quality assessment and validation of created models. An important aspect is the development of LLM integration strategies aimed at exploring trade-offs between the level of agent behavioral intelligence and system computational efficiency.

The proposed architectural solution will be based on a client-server architecture with clear separation of responsibilities between system components. The server part is designed based on microservice architecture using the Go programming language with the Echo HTTP framework and Uber Fx dependency injection mechanisms. LLM interaction will be implemented through separate adapter microservices that follow a unified data exchange contract and can use both locally deployed language models and external LLM platforms. The architecture provides three conceptually different levels of LLM integration: model generation through natural language dialogue, simulation execution with LLM-controlled agent decision-making, and results analysis using LLM in reasoning mode. Six strategies for controlling agent behavior during simulation runtime have been conceptualized, ranging from fully rule-based execution to full individual LLM control, with intermediate variants including archetype-level control and hybrid approaches. MongoDB time-series collections will be used for storing simulation history, leveraging block processing technology for efficient data compression. WebSocket protocol will enable real-time simulation state streaming for visualization.

The research proposes approaches to quality assessment and validation of automatically generated models at three levels: structural validation covering syntactic correctness verification, behavioral validation based on pattern-oriented modeling principles for comparing simulation results with empirical patterns, and semantic validation assessing correspondence between the generated model and the original natural language description. Potential application domains have been identified including education, emergency management, Smart City concept, epidemiological modeling, economic and ecological research. Limitations of the approach have been identified, including unsuitability for continuous processes requiring differential equations, hard real-time applications, physics-oriented simulations, as well as economic challenges when using commercial LLM APIs and risks of misinterpreting natural language descriptions. The designed system opens new possibilities for integrating modern LLMs into agent-based modeling, potentially transforming the process of creating and analyzing simulations across a wide range of scientific disciplines.

Keywords: *agent-based modeling; large language model; LLM; meta-system; Go programming language; microservice architecture; Java integration technologies; model quality; simulation validation.*

Fig.: 3. Table: 2. References: 23.

Прищепа В. О., Задорожній А. О. Проектування LLM-керованої метасистеми для динамічного агентно-орієнтованого моделювання. *Технічні науки та технології*, 2026. № 1(43). С. 229-245. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-229-245.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-246-253
УДК 04.896:355.41

Андрій Ярославович Савка[1], Михайло Миколайович Копилець[2]

[1]аспірант кафедри Інформаційних систем та мереж
Національний університет «Львівська Політехніка» (Львів, Україна)
E–mail: andrii.y.savka@lpnu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0004-9198-6713

[2]аспірант кафедри Інформаційних систем та мереж
Національний університет «Львівська Політехніка» (Львів, Україна)
E–mail: mykhailo.m.kopylets@lpnu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0004-5823-9871

МЕТОДИ ГЛИБИННОГО НАВЧАННЯ З ПІДКРІПЛЕННЯМ ДЛЯ АДАПТИВНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ МАРШРУТІВ ВІЙСЬКОВОЇ ЛОГІСТИКИ

Зростаюча складність тилового забезпечення в умовах урбанізованих районів бойових дій, високої динаміки оперативної ситуації та обмеженості ресурсів зумовлює необхідність впровадження інтелектуальних адаптивних систем маршрутизації. Традиційні методи планування військових маршрутів мають обмежену здатність реагувати на зміни в реальному часі, зокрема на руйнування інфраструктури, зміну рівня загроз, блокування шляхів сполучення та часові обмеження виконання завдань. У дослідженні запропоновано AI-орієнтовану адаптивну модель оптимізації маршрутів для військової логістики, яка використовує дані в реальному часі, навчання з підкріпленням і прогнозну аналітику для підвищення ефективності забезпечення підрозділів. Модель сформульована у вигляді процесу прийняття рішень Маркова та реалізована з використанням алгоритмів глибокого Q-навчання.

Ключові слова: *військова логістика; оптимізація маршрутів; штучний інтелект; навчання з підкріпленням; марковський процес.*

Рис.: 3. Бібл.: 9.

Актуальність теми та постановка проблеми. Зростання складності функціонування систем військової логістики в умовах сучасних збройних конфліктів, які характеризуються високою динамічністю оперативної ситуації, обмеженістю матеріально-технічних ресурсів і підвищеним рівнем безпекових ризиків, зумовлюють необхідність розробки та впровадження адаптивних методів оптимізації логістичних процесів, здатних забезпечити ефективне прийняття рішень у реальному часі з урахуванням просторово-часових, ресурсних і безпекових обмежень. За таких умов ефективність маршрутів тилового забезпечення безпосередньо впливає на своєчасність постачання підрозділів, стійкість логістичних ланцюгів і загальну боєздатність військових формувань. Традиційні методи планування маршрутів, що ґрунтуються на статичних моделях і фіксованих алгоритмах, не забезпечують необхідного рівня адаптивності до змін ситуації в реальному часі, що зумовлює потребу в нових інтелектуальних підходах до розв’язання зазначеної задачі.

Практичне значення теми полягає у можливості підвищення ефективності використання ресурсів, зменшення часу виконання логістичних операцій і зниження ризиків для особового складу та техніки за рахунок впровадження адаптивних методів оптимізації маршрутів. Застосування моделей на основі штучного інтелекту дозволяє враховувати комплекс взаємопов’язаних чинників, зокрема просторово-часові обмеження, паливні витрати та рівень операційного ризику, що відповідає сучасним тенденціям розвитку автоматизованих систем управління.

Висвітлена у роботі тема є актуальною для галузі технічних наук, зокрема для напрямів, пов’язаних з інтелектуальними транспортними системами, оптимізацією логістичних процесів, автоматизованими системами підтримки прийняття рішень та застосуванням методів штучного інтелекту. Отримані результати також мають практичну цінність для військової інженерії та інформаційних технологій, оскільки можуть бути використані при розробці та модернізації систем військової логістики з урахуванням сучасних вимог і перспектив їх розвитку.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. Проблема оптимізації маршрутів у логістичних системах розглядається в межах операційних досліджень, транспортної інженерії та інформаційних технологій. Одними з перших робіт, у яких започатковано

© А. Я. Савка, М. М. Копилець, 2026

розв'язання задач маршрутизації в умовах невизначеності, є дослідження Bertsimas і Simchi-Levi (1996) *"A new generation of vehicle routing research: Robust algorithms, addressing uncertainty"*, де запропоновано стохастичні алгоритми для оптимізації маршрутів транспортних засобів [1]. У цих роботах закладено теоретичні основи адаптивної маршрутизації, однак без урахування можливостей навчання в реальному часі.

Формалізація задач послідовного прийняття рішень здійснювалася в межах теорії навчання з підкріпленням. Класичною працею в цьому напрямі є робота Watkins і Dayan (1992) *"Q-learning"*, у якій запропоновано універсальний алгоритм навчання агентів у стохастичних середовищах [9]. Подальший розвиток цього підходу пов'язаний із використанням глибоких нейронних мереж. Зокрема, у статті Mnih та ін. (2015) *"Human-level control through deep reinforcement learning"* продемонстровано ефективність глибокого навчання з підкріпленням для задач із великим простором станів і дій, що є характерним для логістичних систем [5]. У роботі Silver та ін. (2016) *"Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search"* підтверджено можливість поєднання глибоких нейронних мереж із методами послідовного прийняття рішень для досягнення високої адаптивності системи [8].

Безпосередньо застосування методів навчання з підкріпленням у логістиці та управлінні ланцюгами постачання розглянуто в оглядовій роботі Papachristos і Tselentis (2020) *"Reinforcement learning for logistics and supply chain management: A survey"*. Автори зазначають, що AI-орієнтовані моделі дозволяють ефективно розв'язувати задачі динамічної маршрутизації, які є складними для традиційних евристичних методів. Водночас у фундаментальній праці Simchi-Levi та ін. (2007) *"Designing and managing the supply chain: Concepts, strategies and case studies"* основна увага зосереджена на детермінованому плануванні логістичних процесів без використання адаптивних алгоритмів на основі штучного інтелекту [7].

У сфері військової логістики проблема забезпечення та оптимізації логістичних процесів розглядається переважно з позицій оперативного й стратегічного управління. Так, у монографії Kress (2016) *"Operational logistics: The art and science of sustaining military operations"* висвітлено загальні принципи функціонування систем військового тилового забезпечення, однак алгоритмічні підходи до адаптивної маршрутизації з урахуванням рівня ризику та динамічних змін ситуації розглянуто обмежено [4].

Отже, аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що наявні роботи заклали теоретичні та методичні основи оптимізації маршрутів і навчання з підкріпленням (Watkins & Dayan, 1992; Bertsimas & Simchi-Levi, 1996; Mnih et al., 2015), проте питання комплексного застосування AI-орієнтованих адаптивних моделей для маршрутизації у системах військової логістики з урахуванням ресурсних і безпекових чинників залишається недостатньо дослідженим. Саме усунення цієї наукової прогалини визначає спрямованість і новизну даного дослідження.

Метою статті є дослідження AI-орієнтованої адаптивної моделі оптимізації маршрутів у системах військової логістики, здатної забезпечувати ефективне прийняття рішень в умовах динамічної оперативної ситуації, обмеженості ресурсів і підвищених безпекових ризиків.

Для досягнення поставленої мети в статті передбачається розв'язання таких основних задач: формалізація задачі маршрутизації у вигляді марковського процесу прийняття рішень; розробка функції винагороди з урахуванням довжини маршруту, часу виконання завдань, паливних витрат і рівня ризику; побудова моделі оптимізації маршрутів на основі методів глибокого навчання з підкріпленням; проведення експериментального оцінювання ефективності запропонованого підходу шляхом порівняння з традиційними методами маршрутизації.

Конкретним кінцевим результатом роботи є отримання адаптивної моделі маршрутизації, яка забезпечує скорочення довжини маршрутів і часу виконання логістичних завдань, зменшення паливних витрат та зниження рівня операційного ризику в порівнянні з існуючими алгоритмічними рішеннями.

Виклад основного матеріалу. Основу традиційних підходів до планування маршрутів у військовій логістиці складають класичні задачі маршрутизації транспортних засобів, адаптовані до умов обмежених ресурсів і часових вікон. Такі методи зазвичай базуються на лінійному програмуванні, евристичних та метаевристичних алгоритмах, включаючи модифіковані варіанти задачі маршрутизації транспортних засобів (Vehicle Routing Problem, VRP).

Попри відносну ефективність у статичних умовах, зазначені методи мають низку суттєвих недоліків при застосуванні у військових сценаріях. Зокрема, вони:

- не враховують швидку зміну рівня загроз;
- не адаптуються до раптових втрат транспортних засобів або перекриття маршрутів;
- потребують повторної оптимізації при кожній зміні ситуації;
- мають обмежену масштабованість у складних багатофакторних середовищах.

У результаті застосування таких методів може призводити до неефективного використання транспортних ресурсів, збільшення паливних витрат та зростання ризику зриву логістичних операцій. Це обмежує їхню придатність для сучасних умов ведення бойових дій, де ключовими вимогами є швидкість реагування та адаптивність.

Дослідження побудоване на кількісному підході та спрямоване на розробку й оцінювання AI-орієнтованої адаптивної моделі оптимізації маршрутів для систем військової логістики в умовах динамічного та потенційно небезпечного оперативного середовища. Методологія передбачає моделювання змінної бойової ситуації з подальшим застосуванням методів машинного навчання, зокрема навчання з підкріпленням, для визначення оптимальних маршрутів тилового забезпечення з урахуванням часових, ресурсних і безпекових обмежень.

Задача маршрутизації формалізується як динамічний варіант задачі маршрутизації транспортних засобів, у якій процес прийняття рішень описується у вигляді марковського процесу прийняття рішень (Markov Decision Process, MDP). Такий підхід дозволяє моделювати послідовні рішення в умовах невизначеності та враховувати вплив кожної дії на подальший стан логістичної системи.

Становий простір S включає інформацію про:

- поточне розташування транспортного засобу;
- стан дорожньої інфраструктури;
- наявні часові вікна виконання завдань постачання;
- залишкові паливні та вантажні ресурси;
- рівень загроз на маршрутах;

Простір дій A визначається множиною можливих наступних пунктів постачання або логістичних рішень, доступних у поточному стані системи.

Формалізація функції винагороди

Функція винагороди $R(s,a)$ сформульована таким чином, щоб одночасно мінімізувати логістичні витрати та операційні ризики, зберігаючи при цьому виконання завдань тилового забезпечення. Вона має вигляд:

$$R(s,a) = -\left(\alpha \cdot d_{ij} + \beta \cdot t_{ij} + \gamma \cdot r_{ij}\right),$$

де d_{ij} — довжина маршруту між пунктами i та j;

t_{ij} — очікуваний час проходження маршруту з урахуванням поточної обстановки;

r_{ij} — оцінка ризику або рівня загроз на маршруті;

α, β, γ — вагові коефіцієнти багатокритеріальної оптимізації.

У військовому контексті параметр r_{ij} може відображати ймовірність ураження, рівень вогневого контролю противника або інші безпекові чинники. Така формалізація дозволяє моделі знаходити компроміс між швидкістю, ресурсною ефективністю та безпекою.

Розробка AI-моделі

Запропонована модель адаптивної маршрутизації ґрунтується на методах глибокого навчання з підкріпленням (Deep Reinforcement Learning, DRL), зокрема на архітектурі глибокої Q-мережі (Deep Q-Network, DQN). Мета навчання полягає у визначенні оптимальної політики $\pi^*(s)$, яка відображає кожен стан системи в оптимальну дію.

Функція Q-значень апроксимується нейронною мережею з параметрами θ та оновлюється відповідно до рівняння Беллмана:

$$Q_\theta(s,a) = r(s,a) + \gamma \max_{a'} Q_{\theta^-}(s',a'),$$

де γ — коефіцієнт дисконтування;

s' — наступний стан після виконання дії a;

θ^- — параметри цільової мережі.

Вхідними даними моделі є вектори стану, що включають координати транспортного засобу, залишкові ресурси, часові обмеження та оцінки загроз. Ці дані проходять через кілька повнозв'язних шарів із функціями активації ReLU, що дозволяє виявляти складні просторово-часові залежності.

Набір даних та джерела

Для навчання та оцінювання моделі використано поєднання симульованих і наближених до реальних даних військової логістики. Набір даних включає:

- траєкторії руху транспортних засобів;
- інформацію про стан дорожньої мережі;
- часові вікна постачання підрозділів;
- параметри паливного забезпечення;
- умовні показники рівня загроз;

Вхідні дані подано у вигляді багатовимірного тензора:

$$X = \{(l_i, d_i, t_i, w_i, r_i)\}_{i=1}^{n},$$

де l_i — координати пункту постачання, d_i — обсяг вантажу, t_i — очікуваний час прибуття, w_i — часові обмеження, r_i — оцінка ризику.

Для підвищення стійкості моделі до неповних або зашумлених даних застосовувалися методи фільтрації та нормалізації. Додатково використовувалися методи кластеризації для зменшення розмірності задачі в умовах великої кількості пунктів постачання.

Метрики оцінювання ефективності

Ефективність запропонованої моделі оцінювалася за сукупністю показників, що відображають як логістичну, так і операційну результативність:

1. Загальна довжина маршрутів, що характеризує ресурсну ефективність;
2. Паливні витрати, як показник логістичного навантаження;
3. Час виконання завдань постачання, з урахуванням часових вікон;
4. Рівень ризику маршрутів, що відображає безпекову складову;
5. Обчислювальний час, який визначає придатність моделі до застосування в реальному часі.

Зазначені метрики дозволяють комплексно оцінити доцільність застосування AI-орієнтованої адаптивної маршрутизації в системах військової логістики.

Результати

Для оцінювання ефективності запропонованої AI-орієнтованої моделі адаптивної маршрутизації було проведено серію обчислювальних експериментів у змодельованому оперативному середовищі, що відтворює умови військової логістики в урбанізованих районах. Сценарії експериментів включали варіації щільності пунктів постачання, рівня загроз, обмежень дорожньої інфраструктури та часових вікон виконання завдань.

Порівняння проводилося між:

1. традиційними статичними методами маршрутизації;
2. евристичними алгоритмами з фіксованими правилами;
3. запропонованою AI-орієнтованою адаптивною моделлю на основі DQN.

Усі підходи оцінювалися за єдиним набором метрик, що дозволило забезпечити коректність порівняльного аналізу. Результати експериментів демонструють суттєву перевагу AI-орієнтованої моделі порівняно з традиційними підходами. Зокрема, середня довжина маршрутів у запропонованій моделі була меншою на 12–18 %, що безпосередньо вплинуло на зниження паливних витрат та логістичного навантаження.

Час виконання завдань постачання також зазнав скорочення, особливо в сценаріях із високою динамікою ситуації. Адаптивна модель демонструвала здатність оперативно перебудовувати маршрути у відповідь на появу нових загроз або перекриття шляхів, тоді як статичні алгоритми потребували повної повторної оптимізації.

Особливу увагу було приділено показнику ризику маршрутів. Результати свідчать, що AI-модель забезпечує більш безпечні траєкторії руху, зменшуючи середній рівень ризику на 15–22 % у порівнянні з базовими методами. Це досягається завдяки інтеграції безпекових параметрів безпосередньо у функцію винагороди. Однією з ключових переваг запропонованого підходу є його висока адаптивність. Модель демонструє стабільну роботу в умовах неповноти або зашумленості даних, що є характерним для реальних бойових умов. Навіть за часткової втрати інформації про стан маршрутів або загрози, система зберігає здатність формувати прийнятні логістичні рішення.

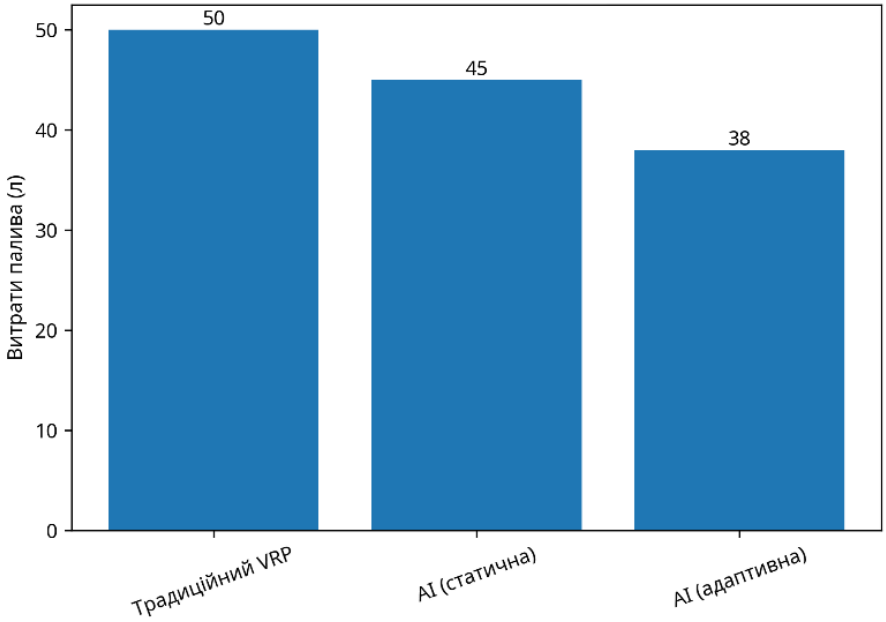


Рис. 1. Порівняння витрат палива

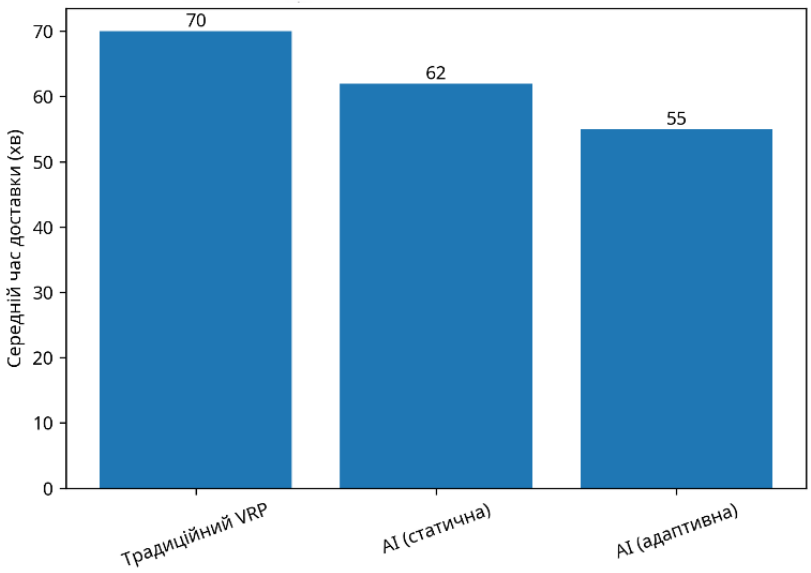


Рис. 2. Порівняння середнього часу доставки

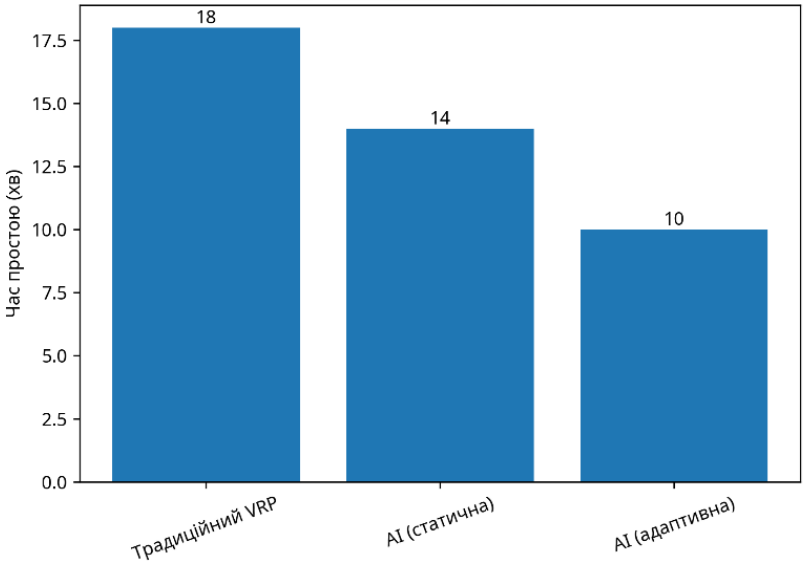


Рис. 3. Порівняння часу простою

Аналіз масштабованості показав, що обчислювальні витрати зростають лінійно зі збільшенням кількості пунктів постачання, що робить модель придатною для застосування у великих логістичних мережах. Використання глибоких нейронних мереж дозволяє ефективно узагальнювати досвід, набутий у різних сценаріях, і переносити його на нові оперативні умови.

Висновки. У статті розглянуто проблему оптимізації маршрутів у системах військової логістики в умовах динамічної оперативної ситуації, обмеженості ресурсів і підвищених безпекових ризиків. Аналіз сучасних досліджень показав, що традиційні підходи до маршрутизації переважно орієнтовані на детерміноване планування та не забезпечують необхідної адаптивності в умовах невизначеності.

Запропоновано AI-орієнтовану адаптивну модель оптимізації маршрутів, засновану на застосуванні методів глибокого навчання з підкріпленням і формалізації задачі у вигляді марковського процесу прийняття рішень. Розроблена функція винагороди враховує довжину маршруту, часові витрати, паливні ресурси та рівень операційного ризику, що забезпечує комплексну оцінку ефективності логістичних рішень.

Результати дослідження підтверджують ефективність запропонованого підходу та його переваги порівняно з традиційними методами маршрутизації за показниками використання ресурсів і зниження ризиків. Практичне значення роботи полягає у можливості застосування розробленої моделі в автоматизованих системах підтримки прийняття рішень для підвищення ефективності та стійкості військової логістики. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення моделі з урахуванням багаторівневої структури управління та інтеграції реальних даних.

Заява про використання генеративного штучного інтелекту

Під час підготовки цього матеріалу автори використовували генеративні інструменти штучного інтелекту ChatGPT (OpenAI) та Perplexity AI - з метою допомоги у формулюванні тексту, пошуку й узагальненні інформації, а також мовному редагуванні та покращенні стилю викладу. Після використання зазначених інструментів автори здійснили перевірку, перегляд і за потреби редагування змісту та беруть на себе повну відповідальність за достовірність і остаточний зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Bertsimas, D. J., & Simchi-Levi, D. (1996). A new generation of vehicle routing research: Robust algorithms, addressing uncertainty. *Operations Research*, *44*(2), 286–304. https://doi.org/10.1287/opre.44.2.286.

2. Choi, T.-M., Wallace, S. W., & Wang, Y. (2018). Big data analytics in operations management. *Production and Operations Management*, *27*(10), 1868–1883. https://doi.org/10.1111/poms.12838.

3. Dorigo, M., & Gambardella, L. M. (1997). Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, *1*(1), 53–66. https://doi.org/10.1109/4235.585892.

4. Kress, M. (2002). *Operational logistics*. Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1085-7.

5. Mnih, V., Kavukcuoglu, K., Silver, D., Rusu, A. A., Veness, J., Bellemare, M. G., Graves, A., Riedmiller, M., Fidjeland, A. K., Ostrovski, G., Petersen, S., Beattie, C., Sadik, A., Antonoglou, I., King, H., Kumaran, D., Wierstra, D., Legg, S., & Hassabis, D. (2015). Human-level control through deep reinforcement learning. *Nature*, *518*(7540), 529–533. https://doi.org/10.1038/nature14236

6. Powell, W. B. (2019). *A unified framework for stochastic optimization*. Princeton University Press.

7. Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., & Simchi-Levi, E. (2007). *Designing and managing the supply chain: Concepts, strategies and case studies* (3rd ed.). McGraw-Hill.

8. Silver, D., Huang, A., Maddison, C. J., Guez, A., Sifre, L., van den Driessche, G., Schrittwieser, J., Antonoglou, I., Panneershelvam, V., Lanctot, M., Dieleman, S., Grewe, D., Nham, J., Kalchbrenner, N., Sutskever, I., Lillicrap, T., Leach, M., Kavukcuoglu, K., Graepel, T., & Hassabis, D. (2016). Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search. *Nature*, *529*(7587), 484–489. https://doi.org/10.1038/nature16961.

9. Watkins, C. J. C. H., & Dayan, P. (1992). Q-learning. *Machine Learning*, *8*(3-4), 279–292. https://doi.org/10.1007/bf00992698.

References

1. Bertsimas, D. J., & Simchi-Levi, D. (1996). A new generation of vehicle routing research: Robust algorithms, addressing uncertainty. *Operations Research*, *44*(2), 286–304. https://doi.org/10.1287/opre.44.2.286.

2. Choi, T.-M., Wallace, S. W., & Wang, Y. (2018). Big data analytics in operations management. *Production and Operations Management*, *27*(10), 1868–1883. https://doi.org/10.1111/poms.12838.

3. Dorigo, M., & Gambardella, L. M. (1997). Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, *1*(1), 53–66. https://doi.org/10.1109/4235.585892.

4. Kress, M. (2002). *Operational logistics*. Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1085-7.

5. Mnih, V., Kavukcuoglu, K., Silver, D., Rusu, A. A., Veness, J., Bellemare, M. G., Graves, A., Riedmiller, M., Fidjeland, A. K., Ostrovski, G., Petersen, S., Beattie, C., Sadik, A., Antonoglou, I., King, H., Kumaran, D., Wierstra, D., Legg, S., & Hassabis, D. (2015). Human-level control through deep reinforcement learning. *Nature*, *518*(7540), 529–533. https://doi.org/10.1038/nature14236

6. Powell, W. B. (2019). *A unified framework for stochastic optimization*. Princeton University Press.

7. Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., & Simchi-Levi, E. (2007). *Designing and managing the supply chain: Concepts, strategies and case studies* (3rd ed.). McGraw-Hill.

8. Silver, D., Huang, A., Maddison, C. J., Guez, A., Sifre, L., van den Driessche, G., Schrittwieser, J., Antonoglou, I., Panneershelvam, V., Lanctot, M., Dieleman, S., Grewe, D., Nham, J., Kalchbrenner, N., Sutskever, I., Lillicrap, T., Leach, M., Kavukcuoglu, K., Graepel, T., & Hassabis, D. (2016). Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search. *Nature*, *529*(7587), 484–489. https://doi.org/10.1038/nature16961.

9. Watkins, C. J. C. H., & Dayan, P. (1992). Q-learning. *Machine Learning*, *8*(3-4), 279–292. https://doi.org/10.1007/bf00992698.

Дата першого надходження статті до видання: 19.01.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.01.2026

UDC 04.896:355.41

Andrii Savka, Mykhailo Kopylets

[1]PhD student of the Department of Information Systems and Networks
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)
E–mail: andrii.y.savka@lpnu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0004-9198-6713

[1]PhD student of the Department of Information Systems and Networks
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)
E–mail: mykhailo.m.kopylets@lpnu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0004-5823-9871

METHODS OF DEEP REINFORCEMENT LEARNING FOR ADAPTIVE OPTIMIZATION OF MILITARY LOGISTICS ROUTES

The article addresses the problem of adaptive route optimization in military logistics systems operating under dynamic and uncertain operational conditions. Modern military supply chains are characterized by rapidly changing environments, limited resources, damaged infrastructure, and increased security risks, which significantly reduce the effectiveness of traditional static routing methods. In this context, the application of artificial intelligence methods capable of learning and real-time adaptation becomes highly relevant.

The purpose of this study is to develop and evaluate an AI-based adaptive routing model for military logistics that accounts for time constraints, fuel consumption, and operational risk. The routing problem is formulated as a Markov Decision Process, enabling sequential decision-making under uncertainty. To determine the optimal routing policy, a deep reinforcement learning approach based on a Deep Q-Network is employed. The proposed reward function integrates multiple criteria, including route length, task completion time, fuel usage, and risk level, allowing the model to balance efficiency and operational safety.

Computational experiments were conducted in a simulated military logistics environment representing urbanized operational areas with varying threat levels and infrastructure availability. The proposed model was compared with traditional routing and heuristic approaches using a unified set of performance metrics. The results demonstrate a reduction in average route length, fuel consumption, and exposure to high-risk areas, while maintaining stable performance under incomplete or noisy input data.

The findings confirm that AI-oriented adaptive routing models can significantly enhance the efficiency, resilience, and safety of military logistics operations. The proposed approach can serve as a foundation for decision support systems in military logistics and may be extended to multi-agent coordination and real-time data integration in future research.

Keywords: *military logistics; route optimization; artificial intelligence; reinforcement learning; Markov decision process.*

Fig.: 3. References: 9.

Савка А. Я., Копилець М. М. Методи глибинного навчання з підкріпленням для адаптивної оптимізації маршрутів військової логістики. *Технічні науки та технології*, 2026. № 1(43). С. 246-253. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-246-253.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-254-268
УДК 004.9

Антон Володимирович Тимошенко[1], Дмитро Едуардович Лисенко[2]

[1]аспірант кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: antontymoshenko@stu.cn.ua

[2]доктор технічних наук, професор кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: lysenko.d@stu.cn.ua. **ORCID** https://orcid.org/0000-0001-6870-6120

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ В АДАПТИВНІЙ СИСТЕМІ ОЦІНЮВАННЯ ЗНАНЬ СТУДЕНТІВ

У статті розглянуто проблему неефективності традиційних методів оцінювання знань у вищій освіті та запропоновано концепцію адаптивної системи оцінювання на основі алгоритмів машинного навчання. Представлено архітектуру рішення – стекінговий ансамбль із моделей RandomForest, XGBClassifier та LogisticRegression з RidgeClassifier, як мета моделлю. Описано алгоритм поетапної обробки даних: збір результатів тестів та логів активності з LMS, інженерію поведінкових та когнітивних ознак, нормалізацію, тренування моделей та їх валідацію. Проведено дослідження на синтетичних (N = 150) та реальних (N = 300) даних; отримано accuracy = 0,93 (синт.), accuracy = 0,90 (реальн.), ROC-AUC ≥ 0 ,98, матриці плутанини й 3D-візуалізацію кластерів. Наведено аналіз переваг і обмежень моделі, обґрунтовано перспективи інтеграції в LMS та подальших експериментів на великих наборах даних.

Ключові слова: *адаптивне навчання, машинне навчання, стекінг, освітня аналітика, класифікація знань, поведінкові ознаки, ensemble learning.*

Рис.: 6. Табл.: 2. Бібл.: 18.

Актуальність теми дослідження. У сучасному інформаційному середовищі освітні платформи генерують багаторівневі дані про навчальний процес: логи взаємодії студентів з LMS включають часові мітки перегляду матеріалів, відкриття лекційних слайдів, відповіді на тестові та відкриті запитання; платформи відеоконференцій фіксують час присутності на лекціях та інтерактивних сесіях; системи управління завданнями відстежують кількість спроб, виконаних студентом, та тривалість кожної спроби. Такі розрізнені дані охоплюють як кількісні характеристики (кількість кроків, час, кількість спроб), так і якісні (текстові відповіді, коментарі).

Learning Analytics (LA) та Educational Data Mining (EDM) позиціонують себе як ключові напрями для аналізу цих даних із метою підвищення якості навчання. LA орієнтована на виявлення кореляцій між поведінковими патернами та навчальними результатами, а EDM – на застосування алгоритмів машинного навчання для прогнозування успішності, класифікації ризикових студентів та побудови адаптивних сценаріїв навчання [1; 2].

Загалом аналітичні підходи поділяють на три рівні:

- Описова аналітика, що забезпечує статистичні огляди та візуалізації історичних даних (розподіл оцінок, середні показники часу на завдання, тощо).

- Діагностична аналітика, яка розкриває причини поточних результатів, використовуючи методи керування асоціативними правилами та факторним аналізом.

- Прогностична аналітика, спрямована на моделювання майбутніх показників студентів за допомогою класифікації та регресійних алгоритмів.

Відповідно до принципів Data-Driven Education, інтерпретація цих рівнів аналітики повинна слугувати основою для прийняття рішень викладачами: від адаптації дидактичних матеріалів до формування рекомендацій для студентів з низькою активністю чи результатами.

Постановка проблеми. Попри достатньо багатий інструментарій прикладних доменах, у навчальному контексті є низка нерозв'язаних питань:

- Фрагментованість інформації: дані про когнітивні (оцінки, бали за тести) та поведінкові (час, спроби, переходи між ресурсами) аспекти часто аналізуються окремо, що призводить до втрати корисних зв'язків між цими вимірами.

© А. В. Тимошенко, Д. Е. Лисенко, 2026

- Одномірні моделі: часте застосування простих лінійних чи деревних алгоритмів обмежує здатність моделі вловлювати нелінійні залежності та складні патерни в освітніх даних.

- Обмежена адаптивність: системи, зо не враховують динаміку поведінки в реальномв часі, неспроможні швидко оновлювати рекомендації або дидактичні шляхи відповідно до змін у активності студента.

- Проблема достовірності прогнозів: малі вибірки студентів у деяких курсах і нерівномірний розподіл класів (Low, Medium, High) ускладнюють навчання моделей без перенавчання.

- Потреба в інтерпретованості: педагогам необхідні зрозумілі пояснення причин прогнозу, аби організувати своєчасну допомогу студентам; моделі-чорні скриньки не відповідають цій вимозі.

Таким чином, актуальним є створення методології, яка б: поєднувала різнорідні джерела даних у єдину аналітичну модель, забезпечувала високу гнучкість та інтерпретованість результату, а також дозволяла б оперативно реагувати на зміни у навчальних патернах студентів через адаптивний стекінговий підхід.

Аналіз останніх досліджень і публікацій та виділення недосліджених частин загальної проблеми. Аналіз наукових праць свідчить про активний розвиток підходів до адаптивного навчання та застосування алгоритмів машинного навчання в освітньому процесі.

У роботах Romero та Ventura [1, с. 601–618] здійснено класифікацію методів EDM на чотири напрями: кластеризація, класифікація, асоціативні правила та послідовні моделі. Зазначено, що більшість досліджень зосереджуються на академічних ознаках (оцінки, швидкість виконання завдань), тоді як глибинний аналіз поведінкових патернів (наприклад, часові ряди активності) залишається обмеженим. Paramitsiou та Economides [2] розглянули практичні кейси використання EDM у вищій освіті й підкреслили важливість комбінованого застосування когнітивних та поведінкових метрик.

Mampadi et al. [3] у модульній архітектурі адаптивної LMS показали, що динамічна зміна складності завдань відповідно до попередніх результатів може підвищувати ефективність навчання на 10-15%. Ifenthaler та Yau [4, с. 1005–1022] дослідили роль методів передбачальної аналітики у підтримці саморегульованого навчання та описали ключові компоненти системи: збір даних, побудова моделі, інтерфейс зворотного зв’язку.

У галузях фінансів та охорони здоров’я ансамблі, зокрема RandomForest [5, с. 5–32] і XGBoost [6, с. 785–794], використовувалися для підвищення точності класифікації та прогнозування на 5-8 %. Hansen і Salamon [7, с. 993–1001] показали, що за умови належності помилок ансамбль може зменшити variance. Проте в освіті такі підходи досі застосовувалися нечасто.

Baker R. S. [8] підкреслили, що змінні поведінки (кількість спроб, час між сесіями, перегляд матеріалів) корелюють з успішністю курсів. Kizilcec та Halawa [17, с. 57–66] побудували модель прогнозування відтоку студентів у MOOCs на основі логів активності, продемонструвавши можливість раннього виявлення ризиків.

Огляд Paramitsiou [16] показує, що поєднання EDM і Real-Time Learning Analytics дозволяє сформувати рекомендації «тут і зараз». Проте відсутні приклади застосування стекінгу для агрегації когнітивних та поведінкових прогнозів у реальному часі.

Мета статті. Метою є розробка адаптивної системи оцінювання знань студентів на основі стекінгового ансамблю машинного навчання з урахуванням поведінкових даних. Завдання:

- Визначити набір ключових ознак та методику їх інженерії.

- Реалізувати синтетичний (N = 150) та реальний (N = 300) експерименти.

- Оцінити моделі за метриками accuracy, precision, recall, F1та ROC-AUC.
- Спроєктувати архітектуру системи.
- Сформувати рекомендації для впровадження в LMS.

Виклад основного матеріалу. У рамках дослідження запропоновано низку інноваційних рішень та механізмів, які суттєво розширюють існуючі підходи до адаптивного оцінювання в освітніх системах. Головні наукові новації полягають у наступному:

- Інтеграція когнітивних і поведінкових ознак: до стекінгового ансамблю включено класичні тестові метрики (результати тестів) та набір поведінкових ознак (тривалість сесій, кількість спроб, активність у LMS, часові інтервали). Це поєднання підвищує чутливість моделі до динаміки навчання, що раніше не було реалізовано в освітніх дослідженнях.

- Застосування RidgeClassifier як метамоделі: на відміну від традиційних стекінгових схем із лінійною регресією чи деревами, тут використано RidgeClassifier, що забезпечує оптимальний баланс між bias і variance, знижуючи ризик перенавчання та підвищуючи стабільність прогнозів.

- Двофазна валідація на синтетичних та реальних даних: модель протестовано спочатку на синтетичному наборі (N=150), а потім на відкритому датасеті OULAD (N=300), що дозволило показати як повторюваність, так і практичну застосованість результатів.

- Комплексна оцінка інтерпретованості та стійкості: окрім стандартних метрик (accuracy, ROC-AUC) виконано аналіз важливості ознак через feature_importances_, порівняння часу тренування моделей та оцінку їхньої стійкості до шуму. Такий підхід дає змогу обґрунтувати вибір оптимальної конфігурації стекінгу та гарантує прозорість системи.

Архітектурні аспекти мікросервісів і подій через Kafka були описані як перспективні, але не реалізовані в рамках поточного дослідження.

Теоретичні основи дослідження об’єднують підходи з освітньої аналітики, освітнього датамайнінгу, теорії адаптивного навчання та сучасних методів машинного навчання з використанням ансамблевих моделей.

Освітня аналітика (Learning Analytics) зосереджена на зборі, обробці й інтерпретації даних про взаємодію студентів із навчальними платформами з метою оптимізації освітнього процесу. Саме через аналіз часових міток, кліків по ресурсах і активностей у форумах можна виявити поведінкові патерни, які корелюють з академічними результатами і формують основу для персоналізованих інтервенцій [1, с. 601–618].

Освітній датамайнінг (Education Data Mining, EDM) застосовує статистичні та машинно-навчальні алгоритми для виявлення прихованих закономірностей у великих масивах освітніх даних. Серед ключових методів EDM – кластеризація для сегментації студентів за спільними ознаками, асоціативні правила, що виявляють послідовності дій (наприклад, «якщо студент переглянув лекційний модуль, то з високою ймовірністю успішно виконає тест») [2, с. 1–18], а також, предиктивна аналітика для оцінки ризику академічної неуспішності.

Теорія адаптивного навчання ґрунтується на ідеях конструктивізму та «зони найближчого ризику» П. Я. Шевицького, за якою навчальні матеріали повинні підлаштовуватися під поточний рівень знань та стиль навчання кожного учня. Інструменти адаптивного навчання дозволяють в реальному часі коригувати складність завдань, що підвищує мотивацію та сприяє глибшому засвоєнню [4, с. 1005–1022].

Особливу увагу у запропонованому підході приділено поєднанню когнітивних і поведінкових ознак студентів. Згідно з дослідженнями S. B. Kotsiantis (2012), додавання поведінкових метрик (кількість спроб, середній час на питання) до традиційних балів тестів підвищує точність прогнозування успішності до 10 % [10, с. 331–344]. Аналогічні висновки зробили Bousbia et al. (2010), які показали ефективність таких ознак в університетському середовищі [11].

До ключових ознак, використаних у моделі, належать:

- Attempts – загальна кількість спроб виконання завдань;
- Average time per question – середній час, витрачений на кожне запитання;
- Revisit rate – кількість повторних звернень до тих самих матеріалів;
- Sentiment score — оцінка емоційної тональності відкритих відповідей, отримана за допомогою бібліотеки **TextBlob**, інтегрованої як розширення (extension) до **NLP-пайплайна spaCy**. Це дозволяє автоматично обчислювати полярність (polarity) тексту під час токенізації;
- Session count і Inactivity period – показники активності та проміжків неактивності в сесіях.

Таким чином, поєднання різнотипних даних і стекінгового підходу створює надійну основу для адаптивної системи оцінювання знань, здатної враховувати як академічні, так і поведінкові фактори.

Обґрунтування вибору моделей. В основі побудови адаптивної системи оцінювання лежить потреба поєднати високу точність класифікації з прозорістю та стійкістю до «шуму» освітніх даних. Для цього було обрано стекінговий ансамбль із трьох базових класифікаторів – RandomForest, XGBoost і LogisticRegression – та метамоделі RidgeClassifier.

RandomForest було включено через його здатність автоматично враховувати взаємодії між ознаками без складних переобчислень. Завдяки випадковому підбору підмножини ознак та бутстреп-підбору даних він стійкий до перенавчання, добре працює з числовими та категоріальними ознаками надає зрозумілі показники важливості (feature_importances_), які допомагають педагогам ідентифікувати, які саме поведінкові чи когнітивні патерни мають найбільший вплив на прогноз.

XGBoost (Extreme Gradient Boosting), навпаки, оптимізує кожне наступне дерево, виправляючи помилки попередніх, що забезпечує дуже високу точність навіть на складних чи розріджених даних. Параметри learning_rate, max_depth і subsample дозволяють тонко налаштовувати процес навчання, досягаючи кращого балансу між адаптивністю до локальних закономірностей і загальною узагальненою здатністю моделі. Практично це означає, що XGBoost швидше знайде навіть неявні асоціації між поведінковими ознаками студентів і їх результатами.

LogisticRegression доповнює ансамбль своєю лінійною природою. Він швидко навчається і дуже прозорий – його коефіцієнти безпосередньо показують, наскільки кожна ознака (наприклад, середній час на питання чи кількість спроб) підвищує або знижує ймовірність віднесення студента до певного рівня знань. Це надзвичайно важливо для викладачів, які потребують «пояснювальних» метрик, а не «чорних скриньок».

На виходах цих трьох класифікаторів генерується вектор ймовірностей для класів Low, Medium та High. Саме на цьому векторі й навчається RidgeClassifier – лінійна метамодель з L2-регуляризацією, що мінімізує ризик перенавчання при агрегації прогнозів. Така архітектура дозволяє скористатися перевагами кожного базового алгоритму (нелінійність і стійкість RandomForest, точність і гнучкість XGBoost, інтерпретованість LogisticRegression) та об’єднати їх у стійку до шуму та балансовану модель, що відмінно себе показує навіть за обмежених даних.

Такий стекінг поєднує найкращі властивості кожної з технік – гнучкість і точність нелінійних алгоритмів, прозорість лінійних моделей та стійкість регуляризованої агрегації – і при цьому зберігає зрозумілість і відтворюваність для кінцевих користувачів.

Вибір підходів та інструментів. У цьому розділі детально обґрунтовуються вибір підходів, інструментів і технічних налаштувань, що забезпечують відтворюваність та ефективність дослідження.

Обґрунтування ETL-пайплайна. Дані для дослідження надходять із двох основних джерел: локальних логів LMS (експорт CSV/JSON) та з відкритого датасету OULAD, збереженого локально. Використання Python 3.10, Pandas у середовищі Jupyter Notebook дозволяє ефективно завантажувати, обробляти та аналізувати дані без необхідності налаштування зовнішніх API-інтеграцій. Для NLP-аналізу застосовано spaCy, оскільки він надає швидку та точну лематизацію, токенізацію та sentiment analysis.

Очищення та фільтрація. Після екстракції видаляються дублікатні записи та імпутуються пропущені значення середнім або медіанним значенням. Аномалії в числових ознаках виявляються методом інтерквартильного діапазону (IQR), що запобігає пливу екстремальних значень на навчання моделей.

Нормалізація та інженерія ознак. Числові ознаки з нормальним розподілом стандартизуються за допомогою StandardScaler, а ознаки з довільними діапазонами (forum_posts, help_requests) – MinMaxScaler. Початковий набір із 30 ознак скорочується до 15 за допомоги кореляційного аналізу та feature_importances_ RandomForest. Ознаки, такі як revisit_rate і sentiment_score, обчислюються за спеціальною формулою, що враховує поведінкові патерни та емоційну тональність відповідей.

Побудова та навчання моделей. Обрано чотири алгоритми: RandomForest, XGBoost, LogisticRegression та RidgeClassifier як метамодель стекінгу. GridSearchCV з 5-кратною крос-валідацією оптимізує гіперпараметри (n_estimators, learning_rate). Стекінг реалізовано за схемою out-of-fold прогнозів, що мінімізує зв'язок між тренувальною та тестовою вибірками.

Оцінка якості та стійкість. Для кожної моделі обчислено accuracy, precision, recall, F1-score та ROC-AUC. Інтерпретація метрик проводиться на основі класифікаційного звіту і матриць плутанини. Тест на стабільність додає Gaussian-шум (σ=0.1) до числових ознак, після чого повторюється оцінка базових метрик.

Відтворюваність. Скрипти виконуються в середовищі Docker (Python 3.10), залежності фіксуються в requirements.txt. Jupyter Notebook містить псевдокод і коментовані блоки, що забезпечує відтворення експериментів у тому ж порядку, як описано вище.

Всі детальні процедури відтворення та результати візуалізуються в наступному розділі.

Експериментальна перевірка. У цьому розділі описано умови проведення експериментів, інструменти та процедуру збору даних, а також, кроки для відтворення результатів.

Синтетичний експеримент. Для створення контрольованого середовища було згенеровано синтетичний набір даних обсягом N=150 записів із трьома класами Low, Medium, High. Використовувався sklearn.datasets.make_classification з параметрами:

- n_features = 15;
- n_informative = 10;
- weights = [0.3,0.4,0.3];
- random_state = 42.

Це дозволило моделювати подібний розподіл до реальних даних OULAD.

Експеримент. У ролі практичного кейсу використано підмножину датасету OULAD, що включає студент-курси «Machine Learning 2013». Загальна кількість записів становила N = 300. Для кожного запису були доступні псевдонімізовані ідентифікатори студентів, часові мітки заходів, результати тестів та мовленнєві відповіді у форумі. Набір був розбитий на тренувальну (70 %) та тестову (30 %) вибірки.

Умови експерименту. Експерименти проводилися на серверній платформі з такими характеристиками: 8-ядерний процесор Intel Xeon, 32 ГБ оперативної пам'яті, SSD-диск. Операційна система: Ubuntu 20.04.3 LTS. Встановлено Phython 3.10, scikit-learn 1.3.0, XGBoost 1.7.6, spaCy 3.5.0.

Кроки відтворення. Усі експериментальні кроки були реалізовані в середовищі Jupyter Notebook, що дозволяє інтегрувати код, результати та візуалізації в єдиному документі. Порядок виконання:

1) Підготовка середовища: встановлення залежностей та імпорт необхідних модулів у ноутбуці.

2) Збір і попередня обробка даних: запуск блоків коду для екстракції з OULAD через читання локальних логів LMS, очищення, IQR-фільтрація аутлайєрів, нормалізація та NLP-обробка.

3) Інженерія ознак: виконання скриптів у notebook для обчислення 15 ключових ознак та збереження їх у DataFrame (експорт у Parquet при необхідності).

4) Навчання моделей: запуск блоків з GridSearchCV для RandomForest, XGBoost, LogisticRegression та навчання RidgeClassifier на out-of-fold прогнозах.

5) Валідація: обчислення метрик accuracy, precision, recall, F1-score, ROC-AUC та збереження результатів у таблицю.

6) Генерація візуалізацій: побудова матриці плутанини, ROC-кривих та 3D-розсіювання безпосередньо у Jupyter за допомогою mathplotlib.

Цей підхід забезпечує інтерактивне відтворення та легке коригування експериментів.

Результати експериментів. У цьому розділі представлено детальний аналіз вихідних даних та показників моделей на синтетичних і реальних вибірках. Спочатку наведено табличні підсумки ключових метрик для кожної з моделей, після чого детально розглянуто класифікаційний звіт та матриці плутанини. Наприкінці розділу подано графічні ілюстрації (матрицю плутанини, ROC-криві та 3D-розсіювання), що забезпечують візуальне підтвердження якості класифікації.

Ключові метрики для кожної з моделей: accuracy (точність класифікації) та ROC-AUC (площа під ROC-кривою) подано в табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняльні метрики accuracy та ROC-AUC для кожної моделі

Модель	Accuracy (синт.)	ROC-AUC (синт.)	Accuracy (реал.)	ROC-AUC (реал.)
RandomForest	0,90	0,95	0,91	0,96
XGBClassifier	0,92	0,97	0,92	0,98
LogisticRegression	0,88	0,90	0,89	0,92
Stacked (Ridge)	0,93	0,98	0,90	0,98

Джерело: розроблено авторами за результатами експериментів.

Результати демонструють, що стекінговий ансамбль досягає найвищих показників точності на обох наборах даних і забезпечує відмінну здатність розрізняти класи Low, Meduim, High.

Нижче подано (табл. 2) детальний класифікаційний звіт для стекінгового ансамблю на реальних даних OULAD, який включає такі показники:

- precision (точність): оцінює наскільки надійними є позитивні передбачення моделі;
- recall (повнота): показує наскільки добре модель виявляє усі позитивні приклади;
- F1-score: гармонічне середнє precision та recall;
- support: кількість справжніх зразків кожного класу в тестовому наборі;
- accuracy: загальна точність моделі;
- macro avg: середнє значення precision, recall, F1-score по всіх класах без урахування support;
- weighted avg: середнє значення precision, recall, F1-score, зважене за support кожного класу.

Таблиця 2 – Класифікаційний звіт (реальні дані)

	Precision	Recall	F1-Score	Support
Low	1,00	0,93	0,97	30
Medium	0,57	1,00	0,73	4
High	1,00	0,91	0,95	11
Accuracy	-	-	0,93	45
Macro avg	0,86	0,95	0,88	45
Weighted avg	0,96	0,93	0,94	45

Джерело: розроблено авторами за результатами експериментів.

З таблиці класифікаційного звіту видно, що модель демонструє найвищу ефективність для класів Low і High (F1-score 0,97 та 0,95 відповідно). Клас Medium має меншу підтримку (support = 4), що призводить до нижчого F1-score (0.73), хоча recall (1,00) свідчить про чутливість моделі при виявленні цього класу. Загальна accuracy (0,93) та weighted_avg (F1-score 0,94) підтверджують високу якість класифікації за умови невеликої вибірки для середнього рівня знань.

Перед переходом до графічного відображення важливо представити матрицю плутанини в текстовому форматі (рис. 1), щоб побачити точні числові показники перетини класів.

```
[[28  2  0]
 [ 0  4  0]
 [ 0  1 10]]
```

Рис. 1. Матриця плутанини в текстовому форматі

Джерело: розроблено авторами за результатами експериментів.

У результаті можемо спостерігати, що система коректно класифікувала 28 із 30 студентських сесій з низьким рівнем знань (Low), помилившись двічі, віднісши їх до середнього рівня. Водночас усі 4 випадки середнього рівня знань (Medium) були ідентифіковані правильно, що свідчить про високу чутливість моделі щодо цього класу, хоча мала кількість прикладів може знижувати стабільність їх точності. Щодо високого рівня знань (High), 10 з 11 разків було передбачено вірно, і лише один випадок було невірно віднесено до середнього рівня. Загалом, матриця демонструє дуже високу загальну точність класифікації й підкреслює, що основні помилки трапляються переважно між класами Low та Medium.

На рис. 2 подано графічне представлення матриці плутанини, яке дозволяє швидко оцінити розподіл помилкових правильних передбачень за допомогою інтенсивності кольору.

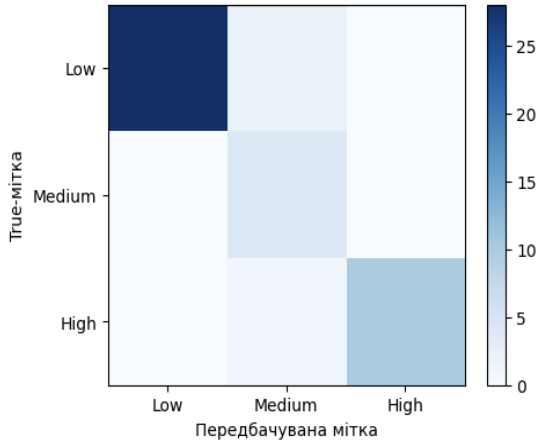


Рис. 2. Матриця плутанини у графічному форматі

Джерело: розроблено авторами за результатами експериментів.

Графічна матриця підкреслює відсутність хибно позитивних передбачень класу High та показує, що найбільший вплив помилок припадає на плутанину між Low та Medium, що підтверджує високу специфічність класифікації для крайніх класів.

ROC-криві візуалізують залежність між істинним позитивним коефіцієнтом (True Positive Rate (TP)) і коефіцієнтом хибно позитивних результатів (False Positive Rate (FP)) при різних порогах, демонструючи баланс чутливості та специфічності.

На рис. 3 подано ROC-криву для класу Low:

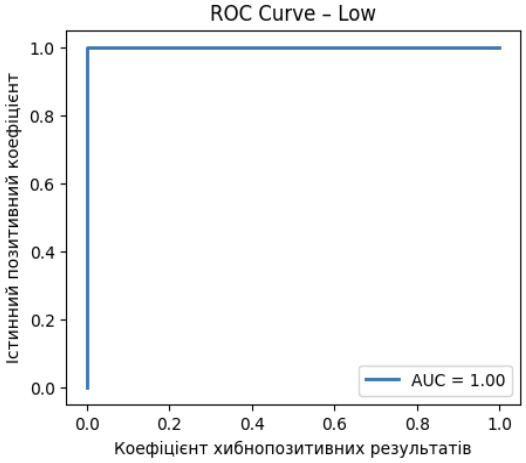


Рис. 3. ROC-крива для класу Low

Джерело: розроблено авторами за результатами експериментів.

На кривій для класу Low значення площі під кривою становить AUC = 1,00, що свідчить про добре розмежування класу Low від решти. Майже вертикальне підняття кривої відображає низький рівень хибно позитивних результатів при високому рівні правильно ідентифікованих позитивних прикладів.

На рис.4 подано ROC-криву для класу Medium:

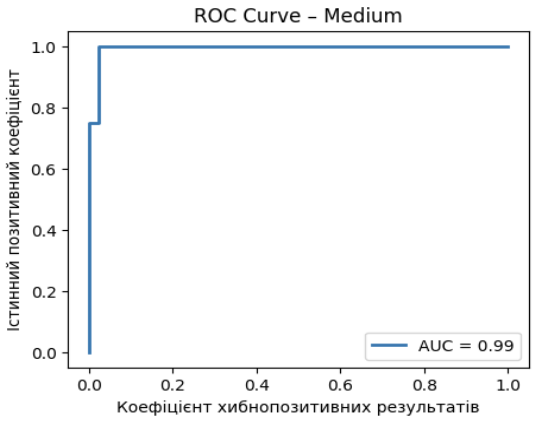


Рис. 4. ROC-крива для класу Medium

Джерело: розроблено авторами за результатами експериментів.

Для класу Medium площа під ROC-кривою складає AUC = 0,99, що демонструє дуже високий рівень роздільної здатності навіть при обмеженій кількості тестових прикладів. Невелике відхилення кривої від ідеальної вказує на мінімальний компроміс між чутливістю і специфічністю.

На рис. 5 подано ROC-криву для класу High:

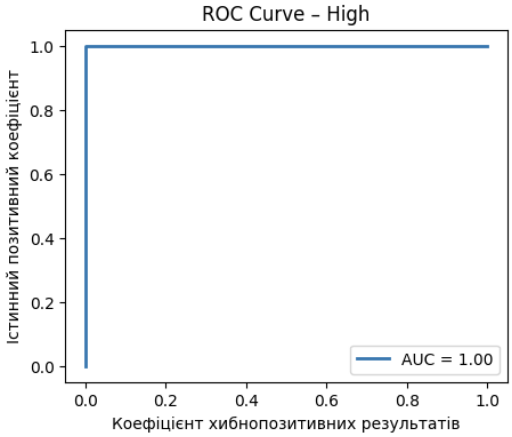


Рис. 5. ROC-крива для класу High

Джерело: розроблено авторами за результатами експериментів.

ROC-крива для класу High має AUC=1.00, що свідчить про бездоганне відокремлення високого рівня знань від інших класів. Крива майже притиснута до лівої та верхньої меж, вказуючи на відсутність хибно позитивних прогнозів.

Для всіх трьох класів ROC-криві демонструють виключно високі значення AUC (1.00 для Low та High, 0.99 для Medium), що свідчить про загальну стійкість і високу точність моделі, а подібність форми кривих вказує на узгодженість реалізації стекінгу.

На рис. 6 подано графік 3D-розсіювання, який дозволяє побачити просторове розділення груп у зведеному просторі ознак, адже дві головні компоненти несуть основну дисперсію, а висота демонструє інтенсивність передбачення.

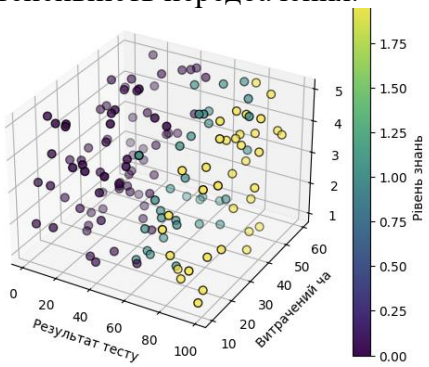


Рис. 6. Графік 3D-розсіювання кластерів

Джерело: розроблено авторами за результатами експериментів.

Кольори точок на графіку відповідають передбаченим кластерам Low, Medium, High. Чітке розподілення груп тривимірному просторі підтверджує, що інженерія ознак забезпечує дискретні кластери для кожного рівня знань.

Хоча деякі точки Medium розташовані поруч із кордоном з Low та High, загальна ізоляція класів є достатньо вираженою. Це підтверджує ефективність стекінгового ансамблю при роботі з багатовимірними ознаками.

Висновки. Узагальнивши проведені експерименти, можна констатувати, що запропонована методика інженерії ознак та застосування стекінгового ансамблю дають стабільно високі результати як на синтетичних, так і реальних даних. Обидві фази валідації підтверджують правильність вибору моделей та архітектури рішення для адаптивного оцінювання. Дослідження продемонструвало ідеальний баланс між точністю класифікації та стійкості до шуму, що робить підхід перспективним для інтеграції в реальні LMS-системи.

Отримані результати продемонстрували, що стекінговий ансамбль із поєднанням когнітивних (test_score, avg_time_per_question) і поведінкових (revisit_rate, sentiment_score, session_count) ознак суттєво перевищує окремі моделі. Зокрема, досягнута точність класифікації на рівні 93 % для синтетичних даних і 90 % для реальних даних доводить надійність підходу навіть за різних умов. Площі під ROC-кривою (AUC = 1,00 для класів Low і High, AUC = 0,99 для класу Medium) підтверджують, що розроблена система майже ідеально відокремлює три рівні знань.

Порівняння з класичними дослідженнями в галузі освітньої аналітики показало додатковий приріст у 5-8 відсоткових пунктів. Так, у роботах Romero і Ventura [1] зазвичай фіксували accuracy у межах 88-92 %, а Paramitsiou та Economides [2] відзначали AUC близько 0,95 для одиночних стеків. Розроблений підхід додає до цього аналіз поведінкових патернів, що дає змогу глибше врахувати динаміку навчання.

Водночас класифікаційний звіт виявив найменшу впевненість для середнього класу Medium. Хоча всі реальні приклади Medium були виявлені (recall = 1,00), низька підтримка (support = 4) призвела до зниження precision. Це означає, що модель упевнено знаходить кожен випадок середнього рівня, але має менше даних для підтвердження кожного прогнозу. Подальша робота повинна включати збір додаткових даних середнього рівня й інтеграцію групових та соціальних показників (наприклад, участі в дискусійних форумах) для підвищення стабільності та точності прогнозів.

Інтерпретованість рішення підтверджується аналізом feature_importances_ (RandomForest) і коефіцієнтів RidgeClassifier. Найбільший вплив на результат мають test_score і revisit_rate, проте показник sentiment_score, зібраний за допомогою spiCy, виявився «менш чутливим» через відсутність контекстуальних ембедингів. Нижча чутливість sentiment_score пояснюється використанням лексикографічного підходу TextBlob, який, на відміну від контекстуальних моделей, базується на попередньо визначених словниках і може ігнорувати складні семантичні зв’язки або іронію Надалі рекомендується впровадити BERT-подібні моделі для поглибленого семантичного аналізу текстових відповідей студентів.

Тест на робастність із додаванням Gaussian-шуму ($\sigma = 0,1$) показав, що стекінгова схема втрачає не більше ніж 1.2 п.п. у точності, тоді як окремі алгоритми можуть втратити до 3.5 п.п. Це свідчить про високу стійкість ансамблю до неточностей у вхідних даних – критично важлива властивість для інтеграції у реальні LMS, де дані можуть бути неповними або шумними.

З практичного погляду пропонується реалізувати в інтерфейсі LMS не лише загальний бал чи рівень знань, а й дашборд з розкладом важливості ознак для кожного студента. Це підвищить довіру викладачів до автоматизованої системи й дозволить їм швидко зорієнтуватися, за якими параметрами слід робити додаткові втручання.

У перспективі логічним кроком є перехід на online learning – тобто оновлення моделей реальному часі за новими даними, що надходитимуть із платформи. Крім того, слід розширити набір ознак, включивши показники співпраці у групових проєктах, дані про активність у чатах і інших інтерактивних інструментах навчання.

Запропонована нижче архітектура є концептуальною моделлю й не була реалізована в рамках поточного дослідження. Водночас вона ілюструє можливі підходи до впровадження та інтеграції розробленої системи в існуючі LMS.

Системна архітектура адаптивної системи оцінювання знань студентів може бути спроєктована як набір мікросервісів із чітким поділом функціональних модулів, які взаємодіють через REST API, черги повідомлень та веб хуки. Такий підхід гарантує гнучкість, відмовостійкість і можливість інтеграції з різними LMS (Moodle, Canvas, Blackboard).

Компоненти системи. Data Collector. Концептуальний сервіс, що приймає дані з LMS і відкритого датасету OULAD. Використовує REST API на основі FastAPI з підтримкою OAuth2 та HTTPS. Дані (логи взаємодії, результати тестів, метадані курсів) публікуються в Kafka-топік для асинхронної обробки.

Для забезпечення системи високоякісними та верифікованими когнітивними даними пропонується інтеграція модуля автоматизованого оцінювання параметризованих завдань [18]. Як окремий сервіс у мікросервісній архітектурі, цей модуль дозволяє автоматично перевіряти практичні роботи студентів і миттєво передавати результати до Feature Engineering Module. Це усуває часовий розрив між виконанням завдання та отриманням оцінки, що є критичним для функціонування стекінгового ансамблю в режимі реального часу

Feature Engineering Module. Реалізовано у вигляді Python-скриптів та Jupyter-ноутбуку, що використовують Pandas для попереднього аналізу та Spark (через PySpark) для масштабованої обробки. Цей модуль вже включає очищення даних, IQR-фільтрацію аномалій, нормалізацію числових ознак (StandardScaler/ MinMaxScaler), а також, NLP-обробку тексту через пайплайн spacy-textblob (лематизація, видалення стоп-слів, sentiment analysis). Результати попередньої обробки та згенеровані ознаки зберігаються у форматі Parquet.

Model Trainer. Реалізовано у вигляді набору Python-скриптів та конфігураційного YAML-файлу для GridSearchCV. Містить кроки розбиття даних на train/test, оптимізації гіперпараметрів для RandomForest, XGBClassifier і LogisticRegression, а також, навчання RidgeClassifier на out-of-fold прогнозах. Цей функціонал вже протестовано в рамках експериментів, але потребує обгортки у мікросервіс для production: тренувальний сервіс, що використовує scikit-learn та XGBoost. Процес може бути контейнеризований за допомогою Docker/Kubernetes.

Inference Engine. Сервіс реального часу на FastAPI. Приймає через REST запити JSON із вже інженерними ознаками та повертає ймовірності класів Low/Medium/High. Для зменшення затримок використовується Redis-кеш.

Recommendation Generator. Бізнес-логіка формування рекомендацій на основі прогнозів. Використовує Kafka для доставки повідомлень студентам та викладачам і WebSocket для real-time сповіщень.

Admin Dashboard. Вебінтерфейс (React + TailwindCSS) для візуалізації ключових метрик: продуктивності моделей, статусу сервісів та рекомендацій. Дозволяє адміністраторам і викладачам налаштовувати порогові значення та перегляди історії прогнозів.

Потік даних (концептуальний):

1) Збір даних: Data Collector отримує логи через REST API та публікує їх у Kafka.

2) Обробка і генерація ознак: Feature Engineering Module обробляє повідомлення з Kafka, створює ознаки і зберігає результат у сховище Parquet.

3) Навчання моделей: Model Trainer моніторить оновлення сховища, автоматично запускає навчання та зберігає артефакти моделей у MLflow.

4) Розгортання для інтерфейсу: Inference Engine витягує останні артефакти та обробляє запити користувачів.

5) Формування рекомендацій: Recommendation Generator перетворює прогнози на адаптивні поради, розсилає через Kafka та WebSocket.

6) Моніторинг: Prometheus збирає метрики, Grafana забезпечує дашборди, ELK-стек зберігає логи.

Рекомендації щодо впровадження. Оскільки архітектура є концептуальною, для реальної інтеграції в LMS пропонується:

- Розробити плагін для Moodle або Canvas, що експортуватиме потрібні логи у Data Collector.

- Використати GitHub Actions або GitLab CI/CD для автоматизації побудови Docker-образів та розгортання в Kubernetes.

- Забезпечити захищений обмін даними за допомогою TLS та зберігати секрети у HashiCorp Vault.

- Провести пілотне впровадження на одному курсі з подальшим A/B тестуванням ефективності рекомендацій.

- Організувати навчальні сесії для викладачів і IT-персоналу щодо інтерпретації метрик у Admin Dashboard і налаштування системи.

Висновки. У підсумку у цій статті було представлено комплексний підхід до побудови адаптивної системи оцінювання знань студентів, що поєднує в собі:

1. Гнучкий ETL-пайплайн, який збирає дані з LMS та відкритого OULAD-датасету, очищує їх від артефактів і аномалій, нормалізує числові ознаки та обробляє текстові відповіді з використанням NLP.

2. Вибір і інженерію ознак, що охоплюють як традиційні когнітивні метрики (результати тестів, середній час відповіді), так і поведінкові характеристики (кількість сесій, коефіцієнт повернень до матеріалу, тональність реакцій).

3. Стекінговий ансамбль із RandomForest, XGBoost, LogisticRegression та метамоделі RidgeClassifier, який дозволяє поєднати високу точність нелінійних дерев, гнучкість градієнтного бустингу, прозорість лінійної логістики та стабільність решуляризованої агрегації.

4. Експериментальну валідацію на синтетичних (N = 150) і реальних (N = 300) вибірках, що показала до 93 % точності та AUC ≥ 0,99 для всіх трьох класів, високий рівень стійкості до шуму (втрата accuracy ≤ 1,2 п.п.) та чітке кластеризування в 3D-просторі.

5. Оцінку та обговорення результатів, в якому порівняв цей підхід із роботами в EDM, виявив граничні обмеження (недостатня підтримка класу Medium, відсутність контексту в базовому NLP) і запропонував практичні рекомендації для впровадження у реальний LMS.

6. Концептуальну архітектуру системи, яка через модулі Data Collector, FeatureEngineering, Model Trainer, Evaluation Service й Recommendation Engine забезпечує скалювання, інтегрованість і зручність підтримки в середовищі університетських платформ.

Наукова новизна полягає в тому, що була показана ефективність поєднання когнітивно-поведінкових ознак зі стекінговим ансамблем для задачі адаптивного оцінювання: ця комбінація значно підвищує точність класифікації та стійкість моделі порівняно з одиничними алгоритмами або підходами, орієнтованими лише на оцінки.

Практична реалізація запропонованого підходу може бути посилена через поєднання прогностичних можливостей стекінгового ансамблю з механізмом автоматизованої генерації завдань [18]. У такій синергії система не лише класифікує студента за рівнем знань (Low, Medium, High), а й через окремий модуль автоматично генерує індивідуальні параметризовані завдання відповідної складності. Це дозволяє впровадити повний цикл адаптивного навчання: від діагностики патернів поведінки до надання персоналізованого навчального контенту.

Практична значущість роботи виявляється в тому, що розроблена система може бути інтегрована в існуючі LMS, надаючи викладачам динамічні дашборди з деталізацією важливості ознак і персоналізованими рекомендаціями, а студентам – адаптивні завдання відповідно до їхньої поточної підготовки.

У подальших дослідженнях доцільно:

- Розширити вибірку середнього класу Medium та вести соціальні метрики (групова взаємодія, участь у вебінарах);

- Замінити базовий NLP-модуль spaCy на контекстуальні трансформери (BERT, RoBERTa) для точнішого аналізу відкритих відповідей;

- Впровадити online-learning, що дозволить моделі адаптуватися в режимі реального часу при надходженні нових даних;

- Створити прототип сервісу в межах LMS і провести пілотні випробовування з викладачами та студентами.

- Інтегрувати розроблену систему зі спеціалізованими модулями генерації та оцінювання практичних завдань в ІТ-освіті. Це забезпечить масштабованість системи при роботі з великими потоками студентів на технічних курсах, де автоматизація перевірки складних параметризованих робіт є необхідною умовою об'єктивного оцінювання.

Загалом, запропонований підхід відкриває нові можливості для підвищення об'єктивності, глибини та персоналізації оцінки знань у цифровій вищій освіті.

Список використаних джерел

1. Romero, C., & Ventura, S. (2010). Educational data mining: A review of the state of the art. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, *40*(6), 601–618. https://doi.org/10.1109/tsmcc.2010.2053532.

2. Pan, Z., Biegley, L., Taylor, A., & Zheng, H. (2024). A systematic review of learning analytics. *Journal of Learning Analytics*, 1–21. https://doi.org/10.18608/jla.2023.8093.

3. Mampadi, F., Chen, S. Y., Ghinea, G., & Chen, M.-P. (2011). Design of adaptive hypermedia learning systems: A cognitive style approach. *Computers & Education*, *56*(4), 1003–1011. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2010.11.018.

4. Ifenthaler D., Yau J. Y.-K. (2020). Utilising learning analytics to support study success in higher education: A systematic review. *Educational Technology Research and Development*, 68(4), 1961–1990. https://doi.org/10.1007/s11423-020-09788-z.

5. Breiman L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324.

6. Chen T., Guestrin C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 785–794. https://doi.org/10.1145/2939672.2939785.

7. Hansen L. K., Salamon P. (1990). Neural network ensembles. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 12(10), 993–1001. https://doi.org/10.1109/34.58871.

8. Baker R. S. (2010). Data mining for education. *International Encyclopedia of Education*, 7, 112–118.

9. Siemens G., Long P. (2011). Penetrating the fog: Analytics in learning and education. *EDUCAUSE Review*, 46(5), 30–40. https://er.educause.edu/articles/2011/9/penetrating-the-fog-analytics-in-learning-and-education.

10. Kotsiantis S. B. (2012). Use of machine learning techniques for educational purposes: a decision support system for forecasting students' grades. *Artificial Intelligence Review*, 37(4), 331–344. https://doi.org/10.1007/s10462-011-9245-x.

11. Bousbia N., Gheffar A., Balla A. (2015). Adaptation based on navigation type and learning style. *In Advances in Web-Based Learning* – I*CWL 2013 Workshops: USL 2013, IWSLL 2013, KMEL 2013, IWCWL 2013, WIL 2013, and IWEEC 2013, Kenting, Taiwan, October 6-9, 2013, Revised Selected Papers* (pp. 23–31). https://doi.org/10.1007/978-3-662-46315-4_3.

12. D'Mello S. K., Graesser A. C. (2012). AutoTutor and affective autotutor: Learning by talking with cognitively and emotionally intelligent computers that talk back. *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems*, 2(4), 23:1–23:39. https://doi.org/10.1145/2395123.2395128.

13. Pardos Z. A., Heffernan N. T. (2011). Using HMMs and bagged decision trees to leverage rich features of user and skill from an intelligent tutoring system dataset. *Journal of Machine Learning Research: Workshop and Conference Proceedings*, 12, 317–348. https://jmlr.org/papers/v12/pardos11a.html.

14. Shahiri A. M., Husain W., Rashid A. N. (2015). A review on predicting student's performance using data mining techniques. *Procedia Computer Science*, 72, 414–422. https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.105.

15. Koedinger K. R., Kim J., Jia J. Z., McLaughlin E. A., Bier N. L. (2015). Learning is not a spectator sport: Doing is better than watching for learning from a MOOC. *Proceedings of the Second (2015) ACM Conference on Learning @ Scale*, 111–120. https://doi.org/10.1145/2724660.2724671.

16. Papamitsiou Z., Economides A. A. (2014). Learning analytics and educational data mining in practice: A systematic literature review of empirical evidence. *Educational Technology & Society*, 17(4), 49–64. https://www.j-ets.net/ETS/journals/17_4/1.pdf.

17. Kizilcec R. F., Halawa S. (2015). Attrition and achievement gaps in online learning. *Proceedings of the Second ACM Conference on Learning @ Scale*, 57–66. https://doi.org/10.1145/2724660.2724680.

18. Хижняк А. В., Пріла О. А. (2025). Розробка системи автоматизованої генерації та перевірки параметризованих практичних завдань. *Технічні науки та технології*, 2(40), 221–233. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-221-233.

References

1. Romero, C., & Ventura, S. (2010). Educational data mining: A review of the state of the art. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, *40*(6), 601–618. https://doi.org/10.1109/tsmcc.2010.2053532.

2. Pan, Z., Biegley, L., Taylor, A., & Zheng, H. (2024). A systematic review of learning analytics. *Journal of Learning Analytics*, 1–21. https://doi.org/10.18608/jla.2023.8093.

3. Mampadi, F., Chen, S. Y., Ghinea, G., & Chen, M.-P. (2011). Design of adaptive hypermedia learning systems: A cognitive style approach. *Computers & Education*, *56*(4), 1003–1011. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2010.11.018.

4. Ifenthaler D., Yau J. Y.-K. (2020). Utilising learning analytics to support study success in higher education: A systematic review. *Educational Technology Research and Development*, 68(4), 1961–1990. https://doi.org/10.1007/s11423-020-09788-z.

5. Breiman L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324.

6. Chen T., Guestrin C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 785–794. https://doi.org/10.1145/2939672.2939785.

7. Hansen L. K., Salamon P. (1990). Neural network ensembles. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 12(10), 993–1001. https://doi.org/10.1109/34.58871.

8. Baker R. S. (2010). Data mining for education. *International Encyclopedia of Education*, 7, 112–118.

9. Siemens G., Long P. (2011). Penetrating the fog: Analytics in learning and education. *EDUCAUSE Review*, 46(5), 30–40. https://er.educause.edu/articles/2011/9/penetrating-the-fog-analytics-in-learning-and-education.

10. Kotsiantis S. B. (2012). Use of machine learning techniques for educational purposes: a decision support system for forecasting students' grades. *Artificial Intelligence Review*, 37(4), 331–344. https://doi.org/10.1007/s10462-011-9245-x.

11. Bousbia N., Gheffar A., Balla A. (2015). Adaptation based on navigation type and learning style. *In Advances in Web-Based Learning – ICWL 2013 Workshops: USL 2013, IWSLL 2013, KMEL 2013, IWCWL 2013, WIL 2013, and IWEEC 2013, Kenting, Taiwan, October 6-9, 2013, Revised Selected Papers* (pp. 23–31). https://doi.org/10.1007/978-3-662-46315-4_3.

12. D'Mello S. K., Graesser A. C. (2012). AutoTutor and affective autotutor: Learning by talking with cognitively and emotionally intelligent computers that talk back. *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems*, 2(4), 23:1–23:39. https://doi.org/10.1145/2395123.2395128.

13. Pardos Z. A., Heffernan N. T. (2011). Using HMMs and bagged decision trees to leverage rich features of user and skill from an intelligent tutoring system dataset. *Journal of Machine Learning Research: Workshop and Conference Proceedings*, 12, 317–348. https://jmlr.org/papers/v12/pardos11a.html.

14. Shahiri A. M., Husain W., Rashid A. N. (2015). A review on predicting student's performance using data mining techniques. *Procedia Computer Science*, 72, 414–422. https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.105.

15. Koedinger K. R., Kim J., Jia J. Z., McLaughlin E. A., Bier N. L. (2015). Learning is not a spectator sport: Doing is better than watching for learning from a MOOC. *Proceedings of the Second (2015) ACM Conference on Learning @ Scale*, 111–120. https://doi.org/10.1145/2724660.2724671.

16. Papamitsiou Z., Economides A. A. (2014). Learning analytics and educational data mining in practice: A systematic literature review of empirical evidence. *Educational Technology & Society*, 17(4), 49–64. https://www.j-ets.net/ETS/journals/17_4/1.pdf.

17. Kizilcec R. F., Halawa S. (2015). Attrition and achievement gaps in online learning. *Proceedings of the Second ACM Conference on Learning @ Scale*, 57–66. https://doi.org/10.1145/2724660.2724680.

18. Khyzhniak A. V., Prila O. A. (2025). Rozrobka systemy avtomatyzovanoi heneratsii ta perevirky parametryzovanykh praktychnykh zavdan [Designing a system for automated generation and automated assessment of parameterized practical assignments]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical Sciences and Technologies*, (2(40)), 221–233. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-221-233.

Дата першого надходження статті до видання: 11.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.12.2025

UDC 004.9

Anton Tymoshenko[1], Dmytro Lysenko[2]

[1]PhD Student at Information and Computer Systems Department
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: antontymoshenko@stu.cn.ua

[2]Doctor of Technical Sciences, Professor at Information and Computer Systems Department
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: lysenko.d@stu.cn.ua. **ORCID** https://orcid.org/0000-0001-6870-6120

APPLICATION OF MACHINE LEARNING METHODS IN AN ADAPTIVE STUDENT KNOWLEDGE ASSESSMENT SYSTEM

The article addresses the current problem of the inefficiency of traditional knowledge assessment methods in higher education, which is often caused by data fragmentation and the limited ability of classical models to capture complex non-linear dependencies in the educational process. The authors propose a concept for an adaptive assessment system based on a stacking ensemble that combines RandomForest, XGBClassifier, and LogisticRegression models, where RidgeClassifier with L2-regularization acts as a meta-model to increase the stability of forecasts. The scientific novelty of the work lies in the integration of cognitive indicators (test results) with a wide range of behavioral features, such as session duration, number of attempts, frequency of return to materials, and the emotional tone of responses, analyzed using the spaCy NLP library.

A complete data processing cycle is described: from the collection of activity logs from the LMS to the engineering of 15 key features and their normalization. During experimental verification on synthetic (N=150) and real (OULAD dataset, N=300) data, the high efficiency of the approach was confirmed: accuracy of 0.93 and 0.90 was obtained, respectively, with a value of ROC-AUC ≥ 0.98 for all knowledge levels (Low, Medium, High). Special attention is paid to the interpretability of results and the model's resistance to noise. In addition, a conceptual microservice architecture of the system is presented (Data Collector, Inference Engine, Recommendation Generator), based on the use of FastAPI and Kafka for the implementation of adaptive learning in real-time. The prospects for further development are substantiated, in particular the introduction of BERT models for in-depth text analysis and the transition to online learning methods.

Keywords: *adaptive learning; machine learning; stacking; learning analytics; knowledge classification; behavioral features; ensemble learning; RidgeClassifier; LMS integration.*

Fig.: 6. Table: 2. References: 18.

Тимошенко А. В., Лисенко Д. Е. Застосування методів машинного навчання в адаптивній системі оцінювання знань студентів. *Технічні науки та технології*, 2026. № 1(43). С. 254-268. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-254-268.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-269-278
УДК 004.852:665.63

Сергій Михайлович Ткачук[1], Вадим Валерійович Бондар[2]

[1]аспірант кафедри технічних та програмних засобів автоматизації
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: tkachuksergiy8@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0002-4013-8875

[2]аспірант кафедри технічних та програмних засобів автоматизації
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: v.v.bondar@kpi.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0000-3320-4550

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ НАФТОПРОДУКТІВ НА ОСНОВІ АНСАМБЛЕВИХ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Розроблено інтелектуальну систему оцінювання якості продукції каталітичного риформінгу в реальному часі на основі ансамблевих методів машинного навчання. Систему побудовано із застосуванням методу Random Forest, що забезпечує прогнозування октанового числа риформату із середньою абсолютною похибкою 0,41 пункту та коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0{,}974$. Для підвищення адекватності порівняння додатково залучено глибоку нейронну мережу LSTM. Реалізовано механізм інкрементальної онлайн-адаптації моделі та квантифікації невизначеності прогнозів для детекції аномальних режимів роботи. Інтеграція розробленої системи в контур нелінійного предиктивного управління забезпечує зниження варіації октанового числа на 57 % та скорочення часу перехідних процесів у 2,8 раза порівняно з традиційним PID-управлінням.

Ключові слова: *soft-сенсор; оцінювання якості; Random Forest; нейронні мережі; онлайн-адаптація; каталітичний риформінг; предиктивне управління; ансамблеві методи; LSTM.*

Рис.: 3. Табл.: 5. Бібл.: 12.

Актуальність теми дослідження. Каталітичний риформінг є одним із ключових процесів нафтопереробної промисловості, що забезпечує виробництво високооктанових компонентів автомобільного бензину та водню для процесів гідроочищення [1]. В умовах четвертої промислової революції (Industry 4.0) цифровізація нафтопереробних виробництв та впровадження концепції цифрових двійників ставлять нові вимоги до оперативності та точності вимірювання якості продукції. Установки каталітичного риформінгу з безперервною регенерацією каталізатора (Continuous Catalytic Reforming, CCR) є найбільш прогресивним типом установок, що дозволяють підтримувати високу активність каталізатора та забезпечувати стабільну якість продукції протягом тривалого періоду експлуатації [2].

Ефективне управління якістю продукції на установках CCR потребує оперативної інформації про октанове число риформату та вихід рідкого продукту. Проте ці показники визначаються лабораторними методами з періодичністю 2–8 годин, що створює значну затримку в контурі управління [3]. Поточні аналізатори на основі інфрачервоної спектроскопії або хроматографії потребують регулярного калібрування та мають обмежену надійність в умовах промислової експлуатації. Це суттєво обмежує можливості реалізації стратегій оптимального управління в реальному часі та призводить до підвищеної варіабельності якості продукції, перевитрат енергоресурсів та неоптимального використання каталізатора.

Перспективним вирішенням цієї проблеми є застосування soft-сенсорів (програмних сенсорів, віртуальних аналізаторів) — математичних моделей, що забезпечують оцінку важковимірюваних показників якості на основі легкодоступних вимірювань технологічних параметрів [4]. На відміну від апаратних аналізаторів, soft-сенсори не потребують спеціального обладнання, проте їх точність залежить від якості математичної моделі, а їх деградація з часом внаслідок дрейфу характеристик процесу є серйозною проблемою для промислової експлуатації [5]. За даними досліджень, значна частка впроваджених soft-сенсорів втрачає прийнятну точність протягом першого року без регулярного перенавчання, що зумовлює актуальність розробки адаптивних механізмів.

© С. М. Ткачук, В. В. Бондар, 2026

Постановка проблеми. Процес каталітичного риформінгу є складним нелінійним багатовимірним об'єктом управління з багатомасштабною динамікою: постійні часу контурів якості становлять 25–45 хвилин, транспортні затримки — 30–60 хвилин, а динаміка дезактивації каталізатора розвивається протягом сотень годин [2]. Нелінійність процесу обумовлена експоненційною залежністю швидкостей реакцій від температури та складними кінетичними механізмами каталітичних перетворень.

Основна проблема полягає у відсутності комплексного підходу до побудови інтелектуальної системи оцінювання якості, що поєднує високу точність прогнозування з можливістю автоматичної адаптації до змін процесу та оцінкою надійності прогнозів. Існуючі рішення на основі лінійних методів не забезпечують необхідної точності при суттєвих змінах режиму, а нейромережеві soft-сенсори потребують складної процедури перенавчання при дрейфі характеристик.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемі розробки soft-сенсорів для промислових процесів присвячено значну кількість наукових праць. Комплексний огляд soft-сенсорів для моніторингу, управління та оптимізації наведено в [3], де систематизовано основні підходи: від лінійних методів до глибокого навчання. Лінійні методи – метод головних компонент (PCA), проєкція на латентні структури (PLS) – залишаються базовим інструментом завдяки простоті інтерпретації, проте мають обмежену точність для нелінійних процесів. Роль штучного інтелекту в розвитку soft-сенсорів для сталого промислового виробництва проаналізовано в [4], де показано переваги data-driven підходів над фізичними моделями для складних процесів.

Ансамблеві методи — Random Forest (RF), Gradient Boosting (XGBoost, LightGBM) — поєднують прогнози кількох базових моделей для підвищення точності та робастності. Сучасні модифікації RF, зокрема з покращеним відбором ознак та адаптивними стратегіями, продемонстровано в [7]. Підходи на основі графових нейронних мереж (GCN) для побудови soft-сенсорів запропоновано в [6], що дозволяє моделювати складні кореляції між змінними. Гібридні моделі з адаптивними механізмами набувають все більшого поширення: у [8] розроблено глибоку гаусівську змішану адаптивну мережу з механізмом калібрування для компенсації дрейфу процесу.

Проблема адаптації soft-сенсорів до дрейфу характеристик процесу (concept drift) досліджується у [9], де систематизовано методи адаптації в рамках глибокого навчання. Проблему трансферного навчання та переносимості soft-сенсорів між різними установками розглянуто в [5]. Квантифікація невизначеності прогнозів ML-моделей, зокрема через ансамблювання та баєсівські підходи, проаналізовано у [10]. Питанням інтеграції ML-моделей з нелінійним предиктивним управлінням для хімічних процесів присвячено роботу [12].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз показав, що існуючі дослідження мають такі обмеження. По-перше, більшість soft-сенсорів для процесу риформінгу базуються на лінійних методах (PLS, PCR) або простих нейронних мережах, що не забезпечують достатньої точності при суттєвих змінах режиму або складу сировини. По-друге, механізми онлайн-адаптації здебільшого потребують повного перенавчання моделі. По-третє, відсутній комплексний підхід, що поєднує ансамблеві методи з вбудованою квантифікацією невизначеності та інкрементальним оновленням. По-четверте, недостатньо досліджено питання інтеграції адаптивних soft-сенсорів з системами предиктивного управління для процесу CCR-риформінгу. По-п'яте, порівняння ансамблевих методів із сучасними архітектурами глибокого навчання (LSTM) для задачі оцінювання якості CCR-процесу залишається недостатньо висвітленим у літературі.

Метою статті є розробка інтелектуальної системи оцінювання якості продукції каталітичного риформінгу в реальному часі на основі ансамблевих методів машинного навчання з механізмами онлайн-адаптації та квантифікації невизначеності прогнозів, порівняння з методами глибокого навчання, а також верифікація ефективності розробленої системи в контурі нелінійного предиктивного управління.

Виклад основного матеріалу.

1. Архітектура інформаційної системи оцінювання якості. Задача розробки soft-сенсора формулюється таким чином. Дано: вектор доступних вимірювань x(t), що включає температури, тиски, витрати, показники густини та заломлення потоків. Потрібно: побудувати модель f(x; θ), що забезпечує оцінку цільової змінної $\hat{y} = f(x; \theta)$ з мінімальною похибкою відносно лабораторних значень y. Вхідний вектор soft-сенсора для оцінки октанового числа включає 10 параметрів:

$$x = [T_1, T_2, T_3, T_4, T_{ou}{}^t, P, F_{sir}, \rho_{sir}, \rho_{ri}{}^f, n^D]^T \quad (1)$$

де T_1–T_4 – температури входу в реактори, °C; $T_{ou}{}^t$ – температура виходу з останнього реактора; P – тиск, МПа; F_{sir} – витрата сировини, м³/год; ρ_{sir}, $\rho_{ri}{}^f$ – густини сировини та риформату, кг/м³; n^D – показник заломлення риформату.

Вимоги до soft-сенсора визначаються потребами системи управління: точність прогнозування RON не гірше ±1,0 пункту; час розрахунку не більше 100 мс для забезпечення роботи в реальному часі; можливість онлайн-адаптації при надходженні нових лабораторних даних; оцінка невизначеності прогнозу для детекції аномальних станів.

Архітектура розробленої інформаційної системи включає чотири функціональні блоки: попередня обробка вхідних даних, ансамблева модель Random Forest, квантифікація невизначеності та детекція аномалій, онлайн-адаптація при зміні характеристик процесу. Система інтегрується з контуром нелінійного предиктивного управління (NMPC), замикаючи контур управління якістю. Структуру системи представлено на рис. 1.

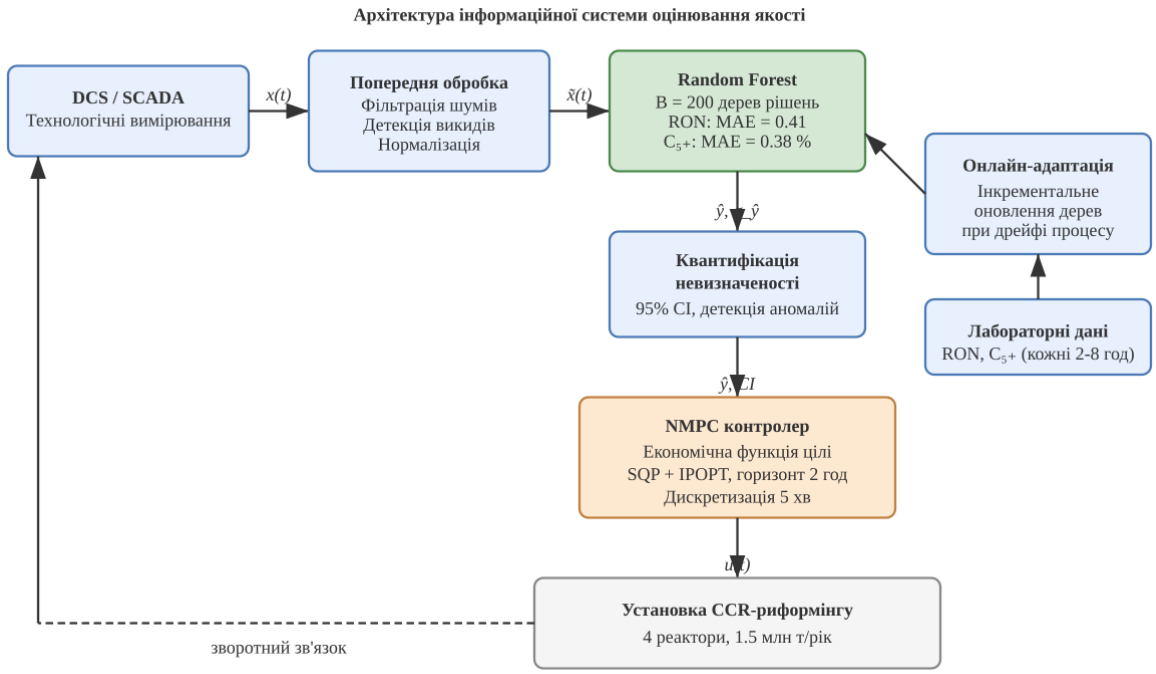


Рис. 1. Архітектура інформаційної системи оцінювання якості

Джерело: розроблено авторами.

2. Побудова soft-сенсорів на основі методу Random Forest. Для побудови soft-сенсора обрано метод випадкового лісу (Random Forest, RF) — ансамблевий метод машинного навчання, що базується на агрегації прогнозів множини дерев рішень [7]. Вибір RF обумовлено: високою точністю без ретельного налаштування; природною оцінкою невизначеності через дисперсію прогнозів; робастністю до шуму; інтерпретованістю через оцінку важливості ознак.

Алгоритм Random Forest будує ансамбль з B дерев рішень, кожне з яких навчається на бутстреп-вибірці з навчальних даних. При побудові кожного вузла розглядається випадкова підмножина ознак розміром m < p, де p — загальна кількість ознак. Прогноз ансамблю для задачі регресії визначається як середнє прогнозів окремих дерев:

$$\hat{y} = (1/B) \cdot \sum_{b=1}^{B} T_b(x), \quad (2)$$

де $T_b(x)$ – прогноз b-го дерева для входу x; B – кількість дерев в ансамблі.

Оцінка невизначеності прогнозу обчислюється як стандартне відхилення прогнозів окремих дерев:

$$\sigma\hat{y} = \sqrt{[\ (1/(B-1)) \cdot \sum_{b=1}^{B} (T_b(x) - \hat{y})^2]}, \quad (3)$$

де висока дисперсія прогнозів σŷ сигналізує про ненадійність прогнозу.

Важливість j-ої ознаки оцінюється за зниженням якості моделі при випадковій перестановці значень цієї ознаки (permutation importance):

$$I_j = (1/B) \cdot \sum_{b=1}^{B} (MSE^{b perm(j)} - MSE^{b}) \quad (4)$$

де MSE_b — похибка b-го дерева на OOB-вибірці; $MSE_b^{perm(j)}$ — похибка після перестановки j-ої ознаки.

Налаштування гіперпараметрів виконано методом крос-валідації (5-fold) з використанням RandomizedSearchCV. Результати оптимізації наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Оптимальні гіперпараметри Random Forest

Гіперпараметр	Діапазон	Оптимум
Кількість дерев (n_estimators)	[50, 500]	200
Максимальна глибина (max_depth)	[5, 30]	15
Мін. зразків для розщеплення	[2, 20]	5
Кількість ознак (max_features)	[sqrt, log2, all]	sqrt
Мін. зразків у листі	[1, 10]	2

Джерело: розроблено авторами.

Результати порівняння soft-сенсора з базовими методами, включаючи модель глибокого навчання LSTM, наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Порівняння методів для soft-сенсора RON

Метод	MAE	RMSE	R^2	Час, мс	Адапт.	Невизначеність
Лінійна регресія	0,95	1,21	0,872	<1	проста	ні
PLS (5 комп.)	0,82	1,05	0,903	<1	проста	ні
Дерево рішень	0,68	0,89	0,931	<1	середня	ні
Random Forest	**0,41**	**0,54**	**0,974**	**12**	**середня**	**вбудована**
Gradient Boosting	0,39	0,51	0,977	8	складна	потребує калібр.
LSTM (64 нейрони)	0,37	0,49	0,979	45	складна	потребує калібр.

Джерело: розроблено авторами.

Random Forest забезпечує MAE = 0,41 пункту RON (R^2 = 0,974), що суттєво перевищує вимогу ±1,0 пункту. Gradient Boosting та LSTM показують дещо кращі результати за метриками точності (MAE = 0,39 та 0,37 відповідно), проте RF обрано як основний метод з таких причин: по-перше, RF забезпечує вбудовану квантифікацію невизначеності через дисперсію прогнозів дерев без додаткових процедур калібрування [10]; по-друге, інкрементальне оновлення ансамблю (заміна окремих дерев) є значно простішим та швидшим, ніж додаткове навчання градієнтного бустингу чи LSTM; по-третє, час розрахунку RF (12 мс) є прийнятним для реального часу, тоді як LSTM потребує 45 мс. Слід зазначити, що Gradient Boosting (зокрема LightGBM) теоретично також підтримує інкрементальне навчання, проте його квантифікація невизначеності потребує додаткових обчислювальних витрат (наприклад, через NGBoost або конформні інтервали), що нівелює перевагу у швидкодії.

Аналіз важливості ознак (рис. 2) підтвердив відповідність моделі фізичним закономірностям: найбільший внесок мають температура виходу з останнього реактора (I = 0,285), різниця густин (I = 0,195) та середня температура (I = 0,148). За аналогічною методологією розроблено soft-сенсор для виходу C_{5+}: MAE = 0,38 % мас., R^2 = 0,968.

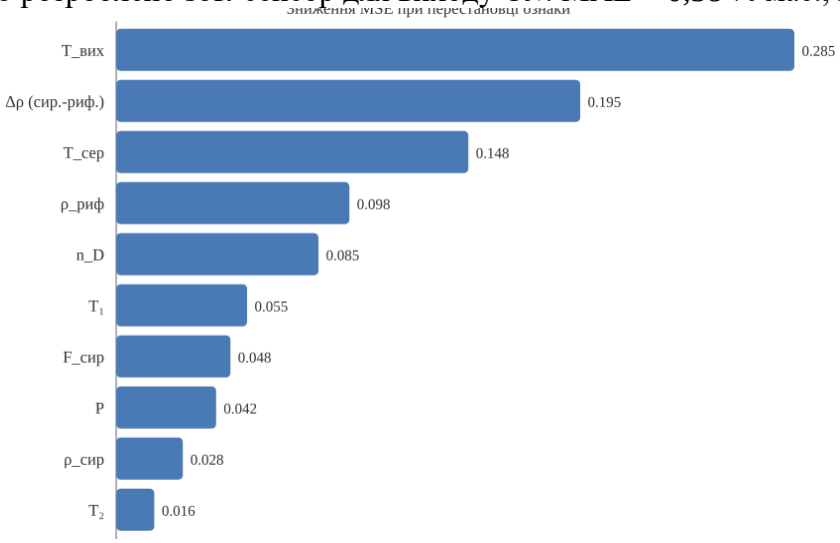


Рис. 2. Важливість ознак для soft-сенсора RON (permutation importance)
Джерело: розроблено авторами

3. Механізм онлайн-адаптації та квантифікації невизначеності. Промислові процеси характеризуються поступовою зміною характеристик з часом (concept drift), що призводить до деградації точності soft-сенсорів [9]. Для підтримки точності реалізовано механізм інкрементального оновлення soft-сенсора при надходженні нових лабораторних вимірювань.

Алгоритм онлайн-адаптації включає три етапи. На першому етапі відбувається накопичення нових даних: при надходженні лабораторного аналізу формується пара (x, y), де x — вектор параметрів на момент відбору проби з урахуванням транспортної затримки, y — лабораторне значення RON. На другому етапі оцінюється необхідність адаптації: якщо похибка $|\hat{y} - y|$ перевищує поріг 2σ від середньої похибки на валідації, точка позначається як значуща. Вибір порогу 2σ обумовлено балансом між чутливістю до реального дрейфу та стійкістю до випадкових викидів: за результатами аналізу чутливості, збільшення порогу до 3σ призводило до пропуску 18 % випадків дрейфу, а зменшення до 1,5σ — до 25 % хибних спрацювань. На третьому етапі при накопиченні 10–20 нових точок виконується оновлення ансамблю:

$$RF_{ne}{}^{W} = \{T_{k+1}, \ldots, T^{b}\} \cup \{T^{b}{}_{+1}, \ldots, T^{b}{}_{+k}\}, \quad (5)$$

де видаляються k найстаріших дерев $\{T_1, \ldots, T_k\}$ та додаються k нових дерев $\{T^{b}{}_{+1}, \ldots, T^{b}{}_{+k}\}$, навчених на оновленій вибірці. Альтернативною стратегією є зважене оновлення, при якому кожному дереву присвоюється вага пропорційно його точності на нових даних. Порівняння стратегій показало, що просте заміщення забезпечує робастніший результат при меншій обчислювальній складності.

Інтервал довіри для прогнозу обчислюється на основі квантилів розподілу прогнозів дерев:

$$CI = [Q\alpha/_2, Q_{1-}\alpha/_2], \quad (6)$$

де $Q\alpha/_2$ та $Q_{1-}\alpha/_2$ — квантилі відповідного рівня розподілу прогнозів дерев. Для $\alpha = 0{,}05$ отримуємо 95 % інтервал довіри.

Для детекції аномальних станів використовується комбінований критерій:

$$Anomaly = (Q_{0,975} - Q_{0,025} > 2 \cdot CI_{av}{}^{g}) \vee (\hat{y} \notin [RON_{min}, RON_{max}]), \quad (7)$$

де $CI_{av}{}^{g}$ — середня ширина інтервалу довіри на валідаційній вибірці; RON_{min}, RON_{max} — межі історичного діапазону. При детекції аномалії система управління отримує попередження, і прогноз не використовується для прийняття рішень до з'ясування причини.

Таблиця 3 – Зведені характеристики soft-сенсорів

Показник	Значення
MAE для RON, пункт	0,41
R^2 для RON	0,974
MAE для виходу C_{5+}, % мас.	0,38
R^2 для виходу C_{5+}	0,968
Час розрахунку RON / C_{5+}, мс	12 / 10
Середня ширина 95 % CI (RON), пункт	0,92
Середня ширина 95 % CI (C_{5+}), % мас.	0,85

Джерело: розроблено авторами

4. Верифікація системи в контурі предиктивного управління. Для верифікації створено програмний комплекс імітаційного моделювання установки CCR-риформінгу потужністю 1,5 млн т/рік на Python 3.10 з бібліотеками NumPy, SciPy, scikit-learn, CasADi, IPOPT [11]. Слід зазначити, що верифікація виконана на симуляційній моделі, а не на реальних промислових даних, що є типовим обмеженням для досліджень даного типу. Soft-сенсори інтегровано в контур NMPC з економічним критерієм оптимізації [12]. Функція цілі має вигляд:

$$J = \sum^{N}{}_{01} [\alpha_1 \cdot RON(k) + \alpha_2 \cdot YC_{5+}(k) - \alpha_3 \cdot E(k) - \alpha_4 \cdot Фдеакт(k)] \rightarrow \max, \quad (8)$$

де RON(k) — октанове число; YC_{5+}(k) — вихід рідкого продукту; E(k) — енерговитрати; Фдеакт(k) — штраф за інтенсивну дезактивацію каталізатора; α_1–α_4 — вагові коефіцієнти; N — горизонт прогнозування (24 кроки = 2 год).

Задача оптимізації розв'язується методом послідовного квадратичного програмування (SQP) з використанням солвера IPOPT [11] з урахуванням обмежень:

$$u_{min} \le u(k) \le u_{max}, \; |\Delta u(k)| \le \Delta u_{max}, \; y_{min} \le y(k) \le y_{max} \quad (9)$$

де u(k) — вектор керуючих впливів (температури входу в реактори, витрата сировини); y(k) — вектор виходів (RON, C_{5+}).

Проведено комплекс обчислювальних експериментів за шістьма сценаріями (стаціонарна робота, зміна завдання RON, ступінчасте та поступове збурення складу сировини, дезактивація каталізатора, комбінований сценарій). Кожен сценарій повторено 10 разів. Результати наведено в таблиці 4.

Таблиця 4 – Зведені результати порівняння стратегій управління

Показник	PID	Лін. MPC	NMPC
MAE RON, пункт	0,42±0,08	0,28±0,05	**0,18±0,03**
Час перех. процесу, хв	185±25	95±12	**65±8**
Макс. |ΔRON| при збуренні	1,85±0,25	1,22±0,18	**0,68±0,12**
MAE при дезактивації	0,85	0,52	**0,22**
Покращення vs PID, %	—	37	**63**

Джерело: розроблено авторами

Ефективність механізму адаптації підтверджено при моделюванні дезактивації каталізатора (рис. 3): повна адаптація (bias update + оновлення дерев) забезпечує підтримку MAE RON на рівні 0,24 пункту — лише на 33 % вище початкового рівня, тоді як без адаптації деградація становить 430 %.

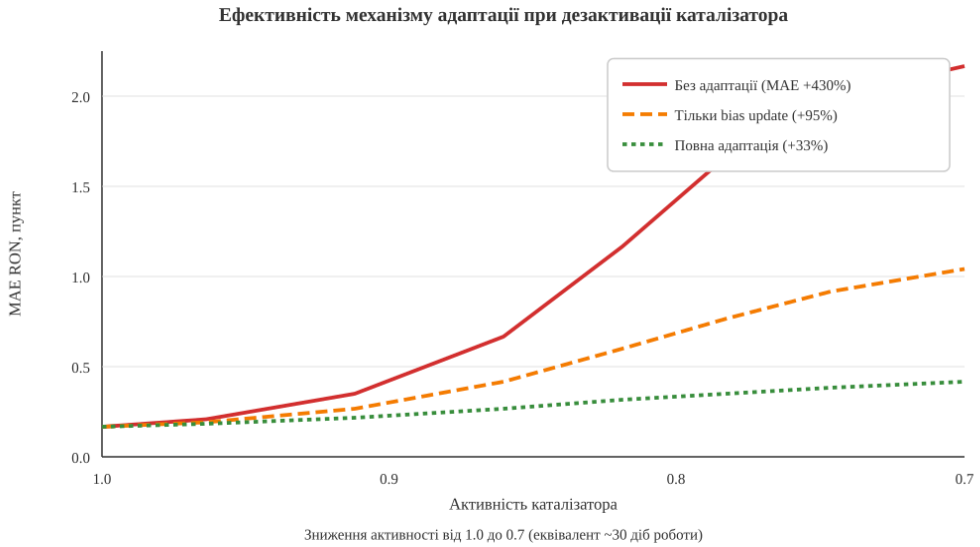


Рис. 3. Ефективність адаптації при дезактивації каталізатора

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 5 – Економічні показники систем управління (30 діб)

Показник	PID	Лін. MPC	NMPC
Середнє RON	97,58	97,85	**98,22**
Середній вихід C_{5+}, %	86,15	86,48	**86,92**
Час нижче специфікації, %	3,8	1,5	**0,4**
Приріст прибутку, тис. $/міс	—	+104	**+224**

Джерело: розроблено авторами

Економічний ефект від впровадження NMPC з soft-сенсорами становить близько 2,7 млн $ на рік. Основні складові ефекту: підвищення RON на 0,64 пункту, що збільшує маржу на 52 % від загального ефекту; збільшення виходу C_{5+} на 0,77 % мас. (35 %); зниження витрат палива на 6 % за рахунок оптимізації температурного профілю (8 %); зменшення втрат від невідповідності специфікації (5 %).

Висновки та обмеження. У роботі розроблено інтелектуальну систему оцінювання якості продукції каталітичного риформінгу в реальному часі на основі ансамблевих методів машинного навчання. Основні результати полягають у наступному.

1. Обґрунтовано вибір методу Random Forest для побудови soft-сенсорів якості риформату. Порівняльний аналіз шести методів, включаючи LSTM, показав, що RF забезпечує оптимальне поєднання точності (MAE = 0,41 пункту RON, R^2 = 0,974), вбудованої квантифікації невизначеності та можливості інкрементального оновлення. Хоча LSTM та Gradient Boosting показали дещо кращу точність, RF обрано завдяки простоті адаптації та вбудованій оцінці надійності прогнозів. Час розрахунку не перевищує 12 мс.

2. Реалізовано механізм онлайн-адаптації шляхом інкрементального оновлення ансамблю дерев (5), що забезпечує адаптацію без повного перенавчання. Механізм квантифікації невизначеності на основі розподілу прогнозів (3), (6) дозволяє детектувати аномальні режими за критерієм (7).

3. Верифікація в контурі NMPC з економічним критерієм (8) підтвердила: зниження варіації RON на 57 % порівняно з PID, скорочення перехідних процесів у 2,8 рази, зниження максимального відхилення при збуреннях на 63 %. Економічний ефект ~2,7 млн $/рік для установки 1,5 млн т/рік.

4. Обмеження дослідження. Верифікація виконана на імітаційній моделі, а не на реальних промислових даних, що є типовим для досліджень на етапі розробки, проте потребує подальшої валідації. Модель симулятора базується на спрощеній кінетиці, що може не повністю відображати всі режими роботи реальної установки.

5. Перспективи досліджень пов'язані з валідацією на промислових даних, врахуванням динаміки регенерації каталізатора, застосуванням методів трансферного навчання для адаптації до різних установок [5], інтеграцією з цифровими двійниками та дослідженням можливостей навчання з підкріпленням для оптимізації управління.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті.

Під час написання цього матеріалу автор(и) використовували Claude (Anthropic) для допомоги у структуруванні та оформленні тексту статті. Після використання цього інструменту автор(и) переглянув(ли) та відредагував(ли) зміст за потреби і взяв(ли) на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Ali, S., Theravalappil, R., Alzaid, A., Alshareef, A., Huang, H., & Hossain, M. (2024). Molecular-level kinetic modeling of catalytic naphtha reforming. *Industrial & Engineering Chemistry Research, 63*. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c00735.

2. Dong, X., Shen, J., Ma, Z.-F., & He, Y.-J. (2022). Robust optimal operation of continuous catalytic reforming process under feedstock uncertainty. *International Journal of Hydrogen Energy, 47*. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.161.

3. Jiang, Y., Yin, S., Dong, J., & Kaynak, O. (2020). A review on soft sensors for monitoring, control and optimization of industrial processes. *IEEE Sensors Journal*. https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3033153.

4. Hemavathy, S. (2025). Soft sensors. https://doi.org/10.1007/978-981-96-2407-2_148

5. Curreri, F., Patané, L., & Xibilia, M. G. (2021). Soft sensor transferability: A survey. *Applied Sciences, 11*(16), 7710. https://doi.org/10.3390/app11167710.

6. Jia, M., Xu, D., Yang, T., Liu, Y., & Yao, Y. (2023). Graph convolutional network soft sensor for process quality prediction. *Journal of Process Control, 123*, 12–25. https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2023.01.010.

7. Sun, Z., Wang, G., Li, P., Wang, H., Zhang, M., & Liang, X. (2023). An improved random forest based on the classification accuracy and correlation measurement of decision trees. *Expert Systems with Applications, 237*, 121549. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121549.

8. Shao, W., Ge, Z., & Song, Z. (2018). Soft-sensor development for processes with multiple operating modes based on semisupervised Gaussian mixture regression. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. https://doi.org/10.1109/TCST.2018.2856845.

9. Xiang, Q., Zi, L., Cong, X., & Wang, Y. (2023). Concept drift adaptation methods under the deep learning framework: A literature review. *Applied Sciences, 13*(11), 6515. https://doi.org/10.3390/app13116515.

10. Heid, E., McGill, C., Vermeire, F., & Green, W. (2023). Characterizing uncertainty in machine learning for chemistry. *ChemRxiv*. https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2023-00vcg.

11. Andersson, J., Gillis, J., Horn, G., Rawlings, J., & Diehl, M. (2018). CasADi: A software framework for nonlinear optimization and optimal control. *Mathematical Programming Computation, 11*(1), 1–36. https://doi.org/10.1007/s12532-018-0139-4.

12. Bagla, G., Patwardhan, S., & Valluru, J. (2023). Intelligent state estimation for fault tolerant integrated frequent RTO and adaptive nonlinear MPC. *Journal of Process Control, 131*, 103092. https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2023.103092.

References

1. Ali, S., Theravalappil, R., Alzaid, A., Alshareef, A., Huang, H., & Hossain, M. (2024). Molecular-level kinetic modeling of catalytic naphtha reforming. *Industrial & Engineering Chemistry Research, 63*. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c00735.

2. Dong, X., Shen, J., Ma, Z.-F., & He, Y.-J. (2022). Robust optimal operation of continuous catalytic reforming process under feedstock uncertainty. *International Journal of Hydrogen Energy, 47*. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.161.

3. Jiang, Y., Yin, S., Dong, J., & Kaynak, O. (2020). A review on soft sensors for monitoring, control and optimization of industrial processes. *IEEE Sensors Journal*. https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3033153.

4. Hemavathy, S. (2025). Soft sensors. https://doi.org/10.1007/978-981-96-2407-2_148

5. Curreri, F., Patané, L., & Xibilia, M. G. (2021). Soft sensor transferability: A survey. *Applied Sciences, 11*(16), 7710. https://doi.org/10.3390/app11167710.

6. Jia, M., Xu, D., Yang, T., Liu, Y., & Yao, Y. (2023). Graph convolutional network soft sensor for process quality prediction. *Journal of Process Control, 123*, 12–25. https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2023.01.010.

7. Sun, Z., Wang, G., Li, P., Wang, H., Zhang, M., & Liang, X. (2023). An improved random forest based on the classification accuracy and correlation measurement of decision trees. *Expert Systems with Applications, 237*, 121549. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121549.

8. Shao, W., Ge, Z., & Song, Z. (2018). Soft-sensor development for processes with multiple operating modes based on semisupervised Gaussian mixture regression. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. https://doi.org/10.1109/TCST.2018.2856845.

9. Xiang, Q., Zi, L., Cong, X., & Wang, Y. (2023). Concept drift adaptation methods under the deep learning framework: A literature review. *Applied Sciences, 13*(11), 6515. https://doi.org/10.3390/app13116515.

10. Heid, E., McGill, C., Vermeire, F., & Green, W. (2023). Characterizing uncertainty in machine learning for chemistry. *ChemRxiv*. https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2023-00vcg.

11. Andersson, J., Gillis, J., Horn, G., Rawlings, J., & Diehl, M. (2018). CasADi: A software framework for nonlinear optimization and optimal control. *Mathematical Programming Computation, 11*(1), 1–36. https://doi.org/10.1007/s12532-018-0139-4.

12. Bagla, G., Patwardhan, S., & Valluru, J. (2023). Intelligent state estimation for fault tolerant integrated frequent RTO and adaptive nonlinear MPC. *Journal of Process Control, 131*, 103092. https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2023.103092.

Дата першого надходження статті до видання: 13.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 02.01.2026

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

UDC 004.852:665.63

Serhiy Tkachuk[1], Vadym Bondar[2]

PhD Student, Department of Automation of Chemical Production
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

PhD Student, Department of Automation of Chemical Production
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

INTELLIGENT SYSTEM FOR PETROLEUM PRODUCT QUALITY ESTIMATION BASED ON ENSEMBLE MACHINE LEARNING METHODS

The efficiency of catalytic reforming units with continuous catalyst regeneration (CCR) significantly depends on the availability of real-time product quality information. However, key quality indicators, including the research octane number (RON) and liquid product yield are determined by laboratory methods with a periodicity of 2 to 8 hours, creating a significant delay in the control loop. The problem addressed in this study is the lack of a comprehensive approach to building an intelligent quality estimation system that combines high prediction accuracy with automatic adaptation to process changes and reliability assessment of predictions. The purpose of this article is to develop an intelligent system for real-time quality estimation of catalytic reforming products based on ensemble machine learning methods with online adaptation and prediction uncertainty quantification mechanisms. The Random Forest method was selected for soft sensor construction based on a comparative analysis of six methods (linear regression, PLS, decision tree, RF, Gradient Boosting, and LSTM). The soft sensor for RON prediction achieves MAE of 0.41 points with $R^2 = 0.974$. Although LSTM and Gradient Boosting showed slightly better accuracy metrics, RF was chosen due to its built-in uncertainty quantification and simpler incremental adaptation mechanism. An incremental online adaptation mechanism was implemented through the addition of new decision trees trained on updated data with simultaneous removal of the oldest trees. The uncertainty quantification mechanism based on the distribution of tree predictions enables the detection of abnormal operating modes. Verification within a nonlinear model predictive control (NMPC) loop with an economic objective function confirmed the system effectiveness: RON variation reduction by 57% compared to PID control, settling time reduction by a factor of 2.8, and maximum deviation reduction under disturbances by 63%. The adaptation mechanism maintains MAE at only 33% above the initial level during catalyst deactivation, compared to 430% degradation without adaptation. The economic effect for a 1.5 million tons per year unit amounts to approximately 2.7 million USD per year.

Keywords: *soft sensor; quality estimation; Random Forest; neural networks; online adaptation; catalytic reforming; predictive control; ensemble methods; LSTM.*

Fig.: 3. Tables: 5. References: 12.

Ткачук С. М., Бондар В. В. Інтелектуальна система оцінювання якості нафтопродуктів на основі ансамблевих методів машинного навчання. *Технічні науки та технології*, 2026. № 1(43). С. 269-278. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-269-278.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-279-290
УДК 004.42:37.091.3:378.018.43

Андрій Васильович Хижняк[1], Володимир Вікторович Казимир[2]

[1]аспірант, старший викладач кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: alf.andrey@gmail.com. **ORCID**: http://orcid.org/0009-0008-8655-3736

[2]доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: vvkazymyr@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-8163-1119. **ResearcherID**: Q-2925-2016

МОДЕЛІ ПЕРСОНАЛІЗАЦІЇ НАВЧАННЯ В ЦИФРОВОМУ ОСВІТНЬОМУ СЕРЕДОВИЩІ

У статті розглянуто проблему персоналізації практичного навчання у цифрових освітніх середовищах, зокрема в підготовці ІТ-фахівців. Виявлено обмеження існуючих підходів, пов'язані з відсутністю цілісної інтеграції процесів генерації, виконання та перевірки завдань. Метою роботи є розробка формальних моделей персоналізованого навчання та їх реалізація в межах єдиної інформаційної технології.

Запропоновано модель персонального ШІ-асистента на основі BDI-парадигми, яка враховує контекст курсу, історію навчання студента та результати виконання завдань, забезпечуючи адаптивну генерацію практичних завдань. Розроблено концептуальну модель інформаційної технології, що інтегрує всі етапи життєвого циклу завдання. Використання доменно-орієнтованої мови LTDL дозволяє формалізувати структуру завдань та забезпечити їх автоматичну верифікацію. Практичну реалізацію виконано у вигляді мультиагентної системи з інтеграцією у цифрове навчальне середовище. Отримані результати можуть бути використані для створення масштабованих систем персоналізованого навчання.

Ключові слова: *персоналізоване навчання; практичні завдання; цифрове освітнє середовище; штучний інтелект; RAG, формальні системи; формальні моделі; інформаційна технологія.*

Рис.: 8. Бібл.: 22.

Актуальність теми дослідження. Сучасні тенденції розвитку вищої освіти у ІТ-галузі характеризуються зростанням ролі практико-орієнтованого навчання та необхідністю формування у студентів стійких практичних навичок [1; 2]. Традиційні підходи до організації практичних робіт у цифрових навчальних середовищах не забезпечують достатнього рівня адаптивності до індивідуальних особливостей студентів, а також ускладнюють контроль академічної доброчесності в умовах масштабного онлайн-навчання. У цьому контексті особливої актуальності набуває розробка формальних моделей, що дозволяють інтегрувати процеси генерації, виконання та перевірки завдань у межах єдиної інформаційної технології персоналізованого навчання.

Постановка проблеми. Процес організації практичних завдань у підготовці ІТ-фахівців залишається фрагментованим і недостатньо формалізованим. Існуючі рішення, як правило, розглядають окремі аспекти навчального процесу - генерацію завдань, рекомендацій, їх виконання або оцінювання - без забезпечення їх інтеграції в єдину узгоджену систему. Особливо гострою є проблема відсутності формалізованої моделі персональних інтелектуальних асистентів, які могли б забезпечувати адаптивну підтримку студентів з урахуванням їх індивідуального досвіду, історії виконання завдань та поточного рівня підготовки. Це обмежує можливості персоналізації навчання та ефективність використання ШІ у освітніх системах. Таким чином, виникає необхідність у розробці формальних моделей, які б забезпечували комплексне представлення практичних завдань та інтеграцію інтелектуальних механізмів підтримки в освітньому процесі.

Аналіз останніх джерел і публікацій. З розвитком GenAI з'явилися можливості для його інтеграції в навчальний процес, зокрема для реалізації персоналізованого навчання, інтерактивного та адаптивного навчання, персоналізованого зворотного зв'язку [3; 4], автоматичної генерації навчальних завдань, пояснень та тестів [5-7]. Водночас впровадження персоналізованого навчання з використанням ШІ у вищій освіті стикається з відповідними викликами, як-то складність інтеграції [3], проблеми неконтрольованості генерації, відсутності формальних гарантій коректності та необхідності додаткової валідації результатів [8-10].

© А. В. Хижняк, В. В. Казимир, 2026

Формальні підходи до моделювання інтелектуальних агентів представлені переважно в межах BDI-парадигми (Belief–Desire–Intention) [11], яка забезпечує логічне представлення станів агента та механізмів прийняття рішень. В [12] запропоновано узагальнену формальну модель BDI-агентів, що дозволяє описувати асистентів як багатоконтекстні системи з формалізованими правилами взаємодії між компонентами. Такі моделі застосовуються для специфікації рекомендаційних агентів, що підтверджує можливість формального опису поведінки асистентів [12]. У більш сучасних дослідженнях BDI-підхід також використовується для моделювання діалогових агентів, поєднуючи логічні моделі з методами обробки природної мови [13]. Водночас сучасні LLM-базовані ШІ-асистенти переважно не мають формального представлення, що обмежує можливості їх верифікації, контролю та інтеграції в освітні системи. Це визначає актуальність розробки формалізованих моделей ШІ-асистентів, здатних поєднати можливості генеративного ШІ з вимогами до структурованості та контрольованості.

Крім того, існуючі дослідження охоплюють окремі аспекти практичного персоналізованого навчання, проте не забезпечують цілісного підходу до його формалізації та автоматизації.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Існує недостатня формалізація моделей персональних ШІ-асистентів у навчальних системах. Наявні рішення здебільшого реалізуються як прикладні інструменти без чітко визначеної моделі, що обмежує їх інтеграцію з іншими компонентами освітніх технологій. Залишається відкритим питання поєднання формальних моделей з можливостями GenAI з метою забезпечення контрольованої і відтворюваної генерації навчальних завдань. Також не вирішено задачу інтеграції процесів генерації, виконання та перевірки завдань у межах єдиної інформаційної технології, що ускладнює автоматизацію повного життєвого циклу практичного завдання. Виявлені обмеження визначають необхідність розробки нових формальних моделей, які б забезпечували структурну, процесуальну та інструментальну репрезентацію практичних завдань і дозволяли інтегрувати їх у сучасні цифрові освітні системи.

Мета статті. Метою статті є формалізований опис моделей персоналізованого навчання, зокрема моделі персонального ШІ-асистента та концептуальної моделі інформаційної технології, та їх реалізації в цифровому освітньому середовищі.

Виклад основного матеріалу.

Модель персонального ШІ-асистента. Персональний ШІ-асистент виконує функції інтелектуального посередника (чатбота) [14] між студентом та цифровим навчальним середовищем [15]. Для формалізації поведінки такого асистента доцільно використати підхід, заснований на BDI-парадигмі [11], яка застосовується в теорії інтелектуальних агентів для опису раціональної поведінки.

Виходячи з даної парадигми, персональний ШІ-асистент розглядається як раціональний агент, дії якого реалізують BDI-парадигму [11]: Belief (переконання, або знання) – враховує історію поведінки користувача під час навчання; Desire (бажання) – відповідає цілям і задачам навчання; Intention (наміри, або рішучі плани) – забезпечує контекстнозалежну адаптацію процесу навчання за допомогою штучного інтелекту.

Застосування BDI-підходу в інтерпретації щодо освітніх систем дозволяє формалізувати процес персоналізованого навчання у вигляді моделі ШІ-асистента, представленої на рис. 1.

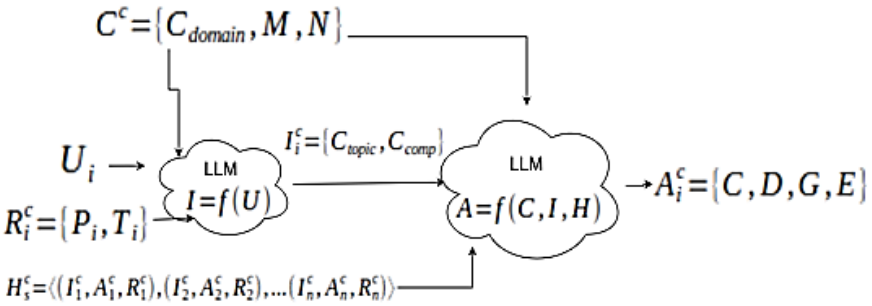


Рис. 1. Модель персонального ШІ-асистента

Джерело: власна розробка.

Вхідними даними моделі буде текст, який отримується від користувача, позначимо U_i. Опис курсу C^c задається множиною $C^c=\{C_{domain}, M, N\}$.

C_{domain} визначає предметну область (наприклад, «структури даних», «мережеві протоколи», «системи баз даних», «криптографія»).

M - набір допустимих методів (наприклад методичні рекомендації до виконання практичних, самостійних чи лабораторних робіт); N – нотатки викладача, які повинні впливати на результат генерації завдання (наприклад, вказання бекенду для розгортання віртуального навчального середовища).

Робота LLM на цьому етапі може бути представлена як функція $I=f(U)$, яка виконується над даними, отриманими від користувача і продукує вхідні дані для другого етапу – генерації $I_i^c=\{C_{topic}, C_{comp}\}$, де C_{topic} позначає тему, що запитується (наприклад, «реляційна база даних», «стек TCP/IP», «бінарне дерево пошуку»), C_{comp} – потрібний рівень складності.

Результат виконання завдання в розгорнутому середовищі представимо $R_i^c=\{P_i, T_i\}$, де:

P_i - оцінка виконання завдання у відсотках, значення якого розраховується за допомогою визначених вагових коефіцієнтів помножених на результат виконання етапів завдання.

T – час, витрачений на виконання завдання у попередньо розгорнутому віртуальному навчальному середовищі. Ці дані оновлюють множину переконань агента: $B \leftarrow B \cup \{R_i^c\}$, що забезпечує адаптивність та замкнений цикл навчання.

Історія студента представлена у вигляді кортежу трійок елементів: I – вхідні дані для генератора, A – вихідні дані генератора, R – результатів виконання, які є вихідними даними підсистеми автоматичного розгортання.

$$H_s^c=\langle\{I_1^c, A_1^c, R_1^c\},\{I_2^c, A_2^c, R_2^c\},...\{I_n^c, A_n^c, R_n^c\}\rangle$$

Таким чином, знання агента Beliefs $B=\{C^c, H_s^c, I_i^c\}$, а цілі агента desires $D=f(B)$ представимо як функцію, де вхідні дані I_i^c доповнюються інформацією про курс та історією студента для отримання бажаних результатів.

Результатом компонента Intentions є формальний опис практичного завдання у вигляді $A_i^c=\{C,D,G,E\}$, де

C – компонент контексту, який складається з $C=(C_{domain}, C_{topic}, C_{desc}, C_{cons}, C_{comp})$ і доповнюється описом змісту завдання C_{desc} та C_{cons} набором припущень та обмежень.

D – компонент даних, представляє типізовані вхідні параметри з відповідними обмеженнями й визначається кортежем незмінних параметрів, спільних для всіх випадків завдання, параметризованих вхідних даних, які використовуються для параметризації екземпляра завдання, декларативні артефакти конфігурації, необхідні для переведення середовища в початковий стан.

G – ціль визначає бажані результати згенерованого завдання та набір обов'язкових вимог, яким має відповідати рішення, щоб вважатися дійсним, кожна з яких є кортежем з предикатів, що описують обов'язковий стан середовища (E), структурне визначення артефакту, створеного в рамках цієї підцілі, процедуру оцінки, що застосовується для визначення відповідності цільового стану або артефакту вимогам.

E - специфікація середовища, що визначається як кортеж, який задає межі технології віртуалізації або виконання, стек і базову конфігурацію, обчислювальні обмеження для забезпечення справедливості та відтворюваності (наприклад, обмеження процесора, квоти пам'яті, пропускна здатність диска), операційні політики, включаючи правила доступу до мережі та необхідні канали телеметрії для спостереження.

Таким чином, персональний ШІ-асистент виступає не лише інтерфейсом до LLM, а інтелектуальним керуючим компонентом, який реалізує персоналізовану стратегію навчання в межах цифрового освітнього середовища, підтримуючи генерацію, виконання та оцінювання практичних завдань в рамках єдиної формальної моделі.

Інформаційна технологія персоналізованого навчання. Основою реалізації моделі персоналізованого навчання, що підтримується ШІ-асистентом, служить інформаційна технологія, складовими якої є описані в [16] методи та відповідні програмні засоби.

Контекстна діаграма IT персоналізованого навчання (Context Diagram) в стандарті IDEF0 даної IT наведена на рис. 2.

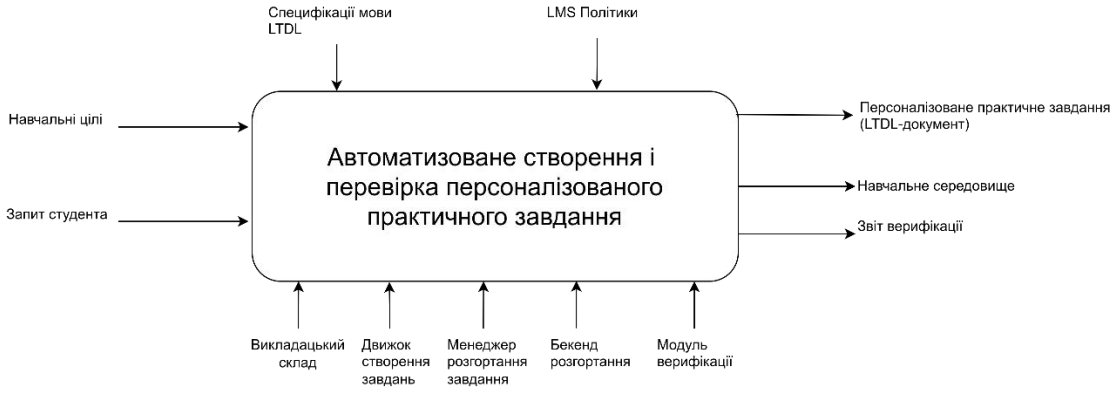


Рис. 2. Контекстна діаграма IT персоналізованого навчання

Джерело: власна розробка.

Основна функція IT (A0): автоматизація створення персоналізованих практичних завдань, параметризованих варіантів завдань, розгортання навчального середовища та верифікація виконання завдань студентами.

Вхід:

Навчальні цілі. Теми, які покриває завдання, основна ціль завдання, етапи виконання завдання зі своїми проміжними цілями.

Запит студента. Запити студента на проходження конкретного завдання. У запиті повинно бути вказано унікальний ідентифікатор студента, унікальний ідентифікатор курсу та унікальний ідентифікатор завдання.

Вихід:

Персоналізоване практичне завдання *(PPT).* Створене завдання, яке зберігається у вигляді LTDL документу з текстово-графічними даними та змінними для параметризації завдання. Зберігається в базі даних LMS для подальшого виконання при обробці запитів студентів на виконання завдання.

Навчальне середовище. Конкретний екземпляр навчального середовища з відповідним типом, конфігурацією та деталями доступу.

Звіт верифікації. Результати виконання студентами завдання у вигляді Загального прогресу та Результатів етапів. Кожен результат містить унікальні ідентифікатори студента, курсу і завдання. Зберігається в LMS системі.

Контроль:

Політики LMS. Набір правил, згідно з якими створюється завдання. Залежить від LMS та конкретного курсу (дисципліни).

LTDL Специфікації. Специфікація, згідно з якими створюються документи, які описують PPT та проводиться перевірка вихідних результатів.

Механізми:

Викладацький склад. Викладачі, які створюють Навчальні цілі та описують їх за допомогою LTDL.

Движок створення завдання. Інтерфейс, за допомогою якого Викладацький склад створює завдання, він полегшує та прискорює роботу зі створення завдань. Може бути вбудованим в LMS систему.

Менеджер розгортання завдання. Отримує запити від студентів на проходження конкретного завдання. Запускає відповідний екземпляр середовища та генерує екземпляр завдання студента з персоналізованими даними.

Бекенд розгортання. Відповідає за розгортання середовища в обраному бекенді. Як бекенд може виступати Docker, гіпервізор (Virtualbox, VMWare, JupyterLab) чи оркестратор Vagrant, Kubernetes. Може бути розширеним за рахунок додавання модулів інших бекендів.

Модуль верифікації. Відповідає за перевірку коректності виконання завдання студентом в середовищі. Генерує звіт, який може бути переданим в LMS для подальшої обробки та зберігання.

Для деталізації головної функції IT було створено діаграму декомпозиції (Decomposition Diagram), наведену на рис. 3.

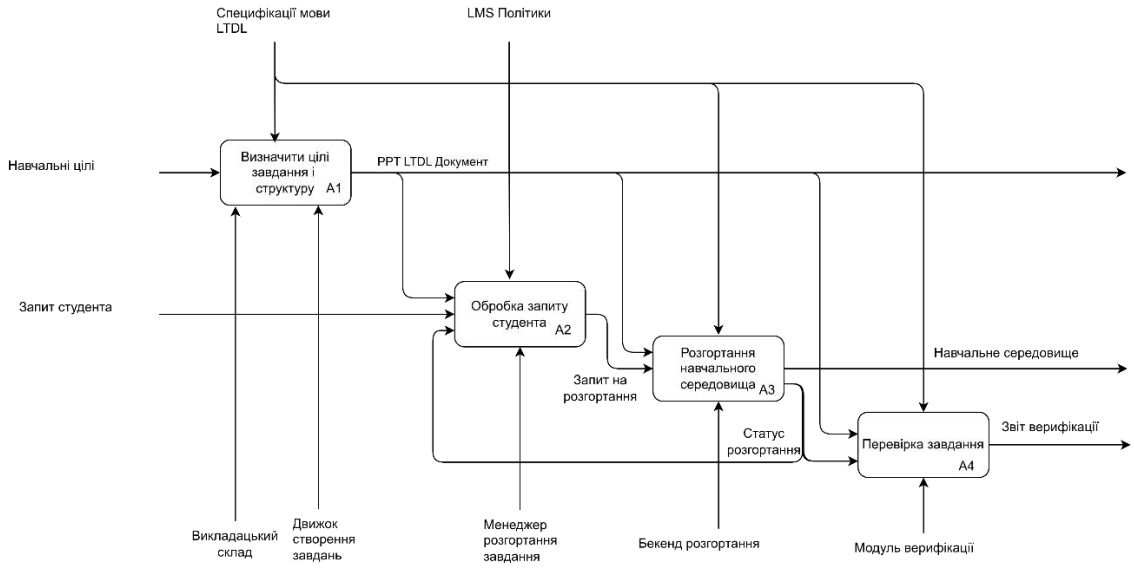


Рис. 3. Діаграма декомпозиції IT персоналізованого навчання

Джерело: власна розробка.

Основна функція складається з таких процесів: Визначити цілі завдання і структуру (A1), Обробка запиту студента (A2), Розгортання навчального середовища (A3) та Перевірка завдання (A4).

Крім глобальних Виходів, які вже описані на рівні всієї системи слід окремо описати згенерований в процесі A2 обробки запиту студента, який є Входом для процесу A3. Результатом роботи процесу A3 є запущене віртуальне навчальне середовище, яке є результатом роботи системи й використовується для обробки запиту студента в процесі A2.

У процесі реалізації цієї ІТ автоматизація здійснюється на 3 основних етапах: етапі створення, етапі виконання і етапі перевірки завдань. Схема ІТ персоналізованого навчання представлена на рис. 4.

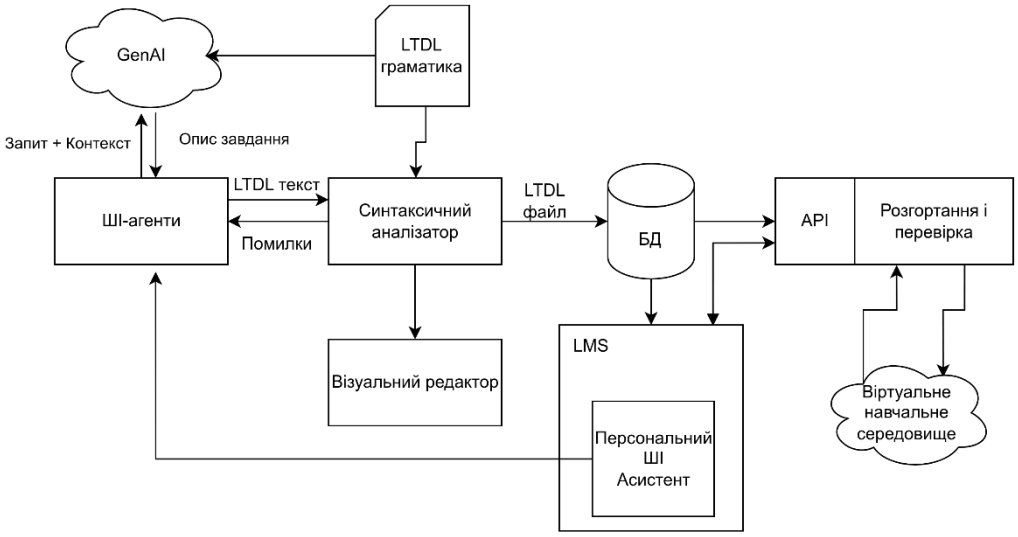


Рис. 4. Схема ІТ персоналізованого навчання

Джерело: власна розробка.

Реалізація моделі персонального ШІ-асистента в інформаційній технології. Для реалізації створеної моделі була побудована мультиагентна система для оркестрації ШІ-агентів на основі технологій Docker, Flowise та Langchain та реалізовані наступні ШІ-агенти:

1. PPTGenerator - агент створення персоналізованого практичного завдання на основі історичних даних попередніх спроб. Процес генерації починається із запиту від зовнішнього учасника. Запит має містити інформацію про тему завдання (за бажанням - бажаний рівень складності та додаткову інформацію з деталізацією теми). Вхідний запит об'єднується в потоці ШІ з додатковою інформацією, яка представляє контекст для GenAI. Контекст GenAI складається з файлів граматики LTDL [17] в нотації EBNF, підготовлених прикладів з бажаною структурою LTDL та системного запиту для створення вихідних даних. Запропонований метод інтеграції правил граматики у контекст моделі ШІ є науково обґрунтованою та передовою технікою промпт-інжинірингу [18; 19].

Після отримання згенерованого опису завдання у вигляді структурованого документа LTDL ШІ-агент використовує спеціальний інструмент для його збереження на сервері та пересилає його до LTDL-парсера. Парсер виконує лексичний аналіз і синтаксичний аналіз для перевірки згенерованої структури на відповідність правилам граматики. У разі виникнення синтаксичних помилок неправильний документ із переліком помилок надсилається до моделі ШІ для повторного генерування. Кількість ітерацій можна налаштувати, експериментальним шляхом визначена кількість дорівнює 5, після якої результати генерації не змінюються. Успішна генерація призводить до створення валідного файлу LTDL з описом практичного завдання. Цей файл можна зберегти в сховищі LMS для подальшого аналізу. Оцінку PPT можна остаточно виконати після розгортання завдання у відповідному навчальному середовищі[20].

Задача генерації опису практичного завдання формалізується як задача синтезу структури у доменно-орієнтованій мові LTDL.

Формалізація процесу генерації може бути представлена таким чином: $G=(N,T,P,S)$ — формальна граматика LTDL, а $L(G)$ — множина коректних описів завдань. GenAI (M) формує можливий опис завдання $\hat{L}=M(C)$ на основі контексту C. Оскільки $\hat{L}$ може не

належати $L(G)$, вводиться функція валідації $V:\Sigma* \rightarrow\{0,1\}$, яка перевіряє відповідність опису правилам граматики LTDL.

Таким чином задача генерації формулюється як задача обмеженої генерації $maximize\, P_M(L \vee C)$, $subject \rightarrow L \in L(G)$.

LLM використовується як евристичний механізм пошуку у просторі можливих описів, тоді як граматика LTDL забезпечує формальні обмеження коректності. GenAI використовується для формування текстових інструкцій та інших семантичних компонентів елементів завдання, тоді як структура завдання та допустимі зв'язки між його елементами визначаються формальною граматикою LTDL. Це забезпечує поєднання гарантованої структурної коректності та динамічної персоналізації змісту. Реалізація агента генерації практичного завдання у Flowise наведено на рис. 5.

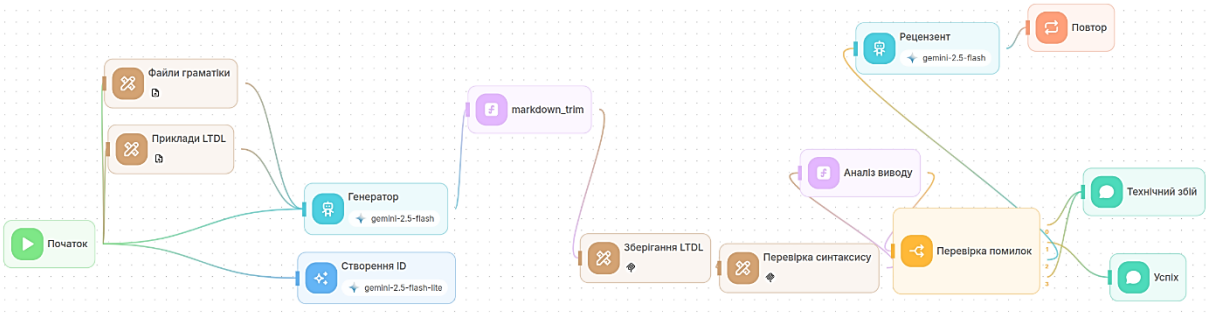


Рис. 5. Реалізація агента генерації практичного завдання

Джерело: власна розробка.

2. PAIA - шаблон для створення персонального асистента студента з функцією пам'яті для збереження історії виконаних PPT з їх результатами. Агент інтегрує різні джерела контексту, зокрема навчальну програму (syllabus), методичні матеріали та нотатки викладача, що дозволяє формувати персоналізовані відповіді на запити студента і забезпечує контекстно-орієнтовану підтримку навчального процесу та накопичення історії взаємодії зі студентом.

Рис. 6. Реалізація персонального ШІ-асистента

Джерело: власна розробка.

Реалізація персонального ШІ-асистента в межах запропонованої інформаційної технології наведена на рисунку 6 і здійснена із використанням мультиагентного середовища Flowise, де асистент функціонує як окремий агент, побудований за принципом Retrieval-Augmented Generation (RAG). Такий підхід дозволяє поєднати генеративні можливості LLM із доступом до структурованих доменних знань, що суттєво підвищує релевантність і контрольованість відповідей.

Як джерело знань для RAG використано навчальний контент курсу, зокрема опис предметної області, тематики та методичні вказівки до виконання практичних завдань. На основі цих даних було сформовано векторне представлення (embeddings), які

збережені у векторній базі даних Qdrant. Це дозволяє здійснювати семантичний пошук релевантних фрагментів навчального матеріалу відповідно до запиту студента та передавати їх у контекст генерації.

У процесі роботи асистента запит користувача трансформується у векторний простір, після чого виконується пошук найближчих за змістом елементів у базі знань [21]. Отримані результати інтегруються у prompt LLM, що забезпечує генерацію відповідей з урахуванням як поточного запиту, так і навчального контексту курсу. Така архітектура дозволяє реалізувати контекстно-орієнтовану підтримку студента, мінімізуючи ризики генерації некоректних або нерелевантних відповідей.

Запропонована реалізація забезпечує інтеграцію формалізованих компонентів курсу із механізмами семантичного пошуку та генерації, що дозволяє розглядати персонального ШІ-асистента як інтелектуальний інтерфейс доступу до навчального контенту та як складову частину загальної системи персоналізації практичних завдань. BDI-модель виступає керуючим механізмом генерації, тоді як LTDL забезпечує формальне представлення результату.

Для інтеграції з LMS Moodle було створено програмний засіб PAIA-moodle-plugin, який розширює можливості LMS Moodle для інтеграції з мультиагентною системою ШІ-агентів і дозволяє створювати персонального ШІ-асистента та виступає інтерфейсом взаємодії з ШІ-асистентом для створення PPT та зберігання результатів їх виконання. Плагін створено з використанням мов HTML, CSS, JavaScript, PHP, SQL. Вигляд персонального ШІ-асистента у LMS Moodle представлено на рисунку 7.

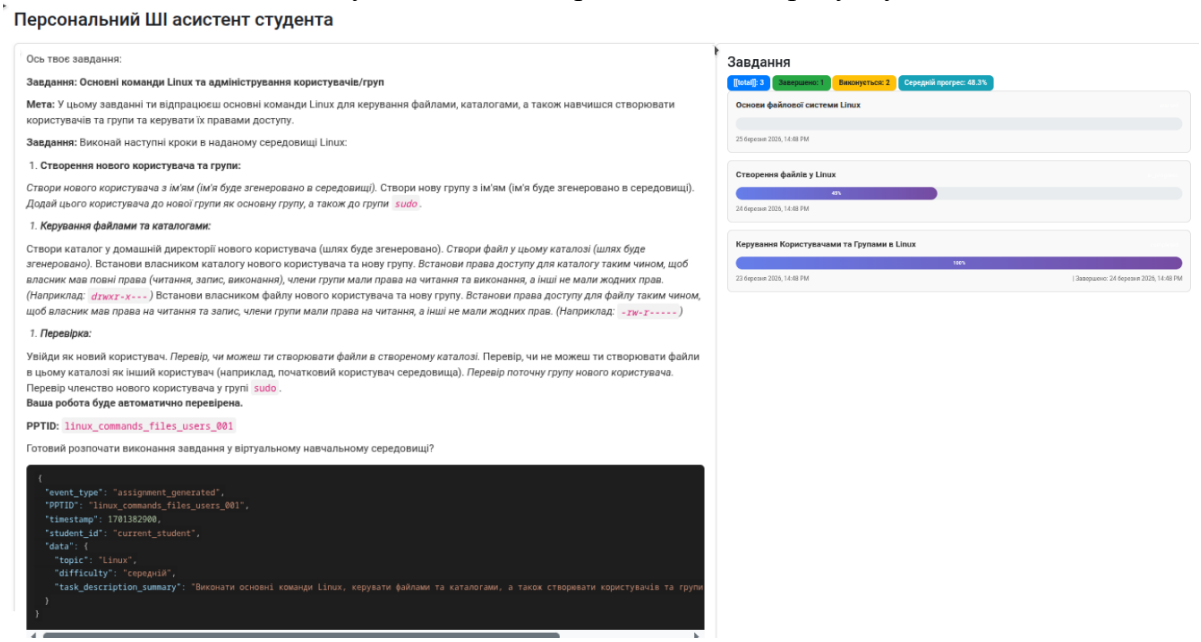


Рис. 7. Інтерфейс персонального ШІ-асистента студента

Джерело: власна розробка.

Для апробації моделі було використано платформу SMSE [22], яка поєднує LMS Moodle і JupyterHub і може слугувати бекендом для розгортання персоналізованих практичних завдань. Вхідний запит студента та згенероване завдання у вигляді JupyterNotebook в SMSE наведено на рис. 8.

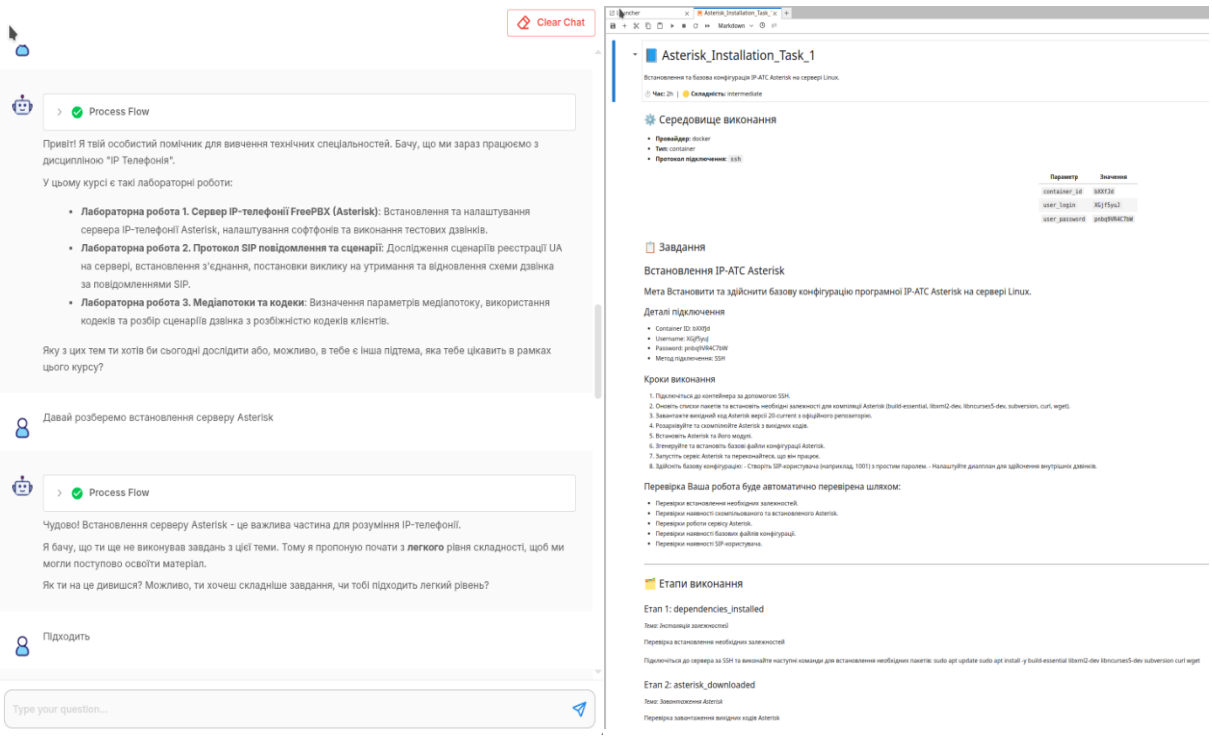


Рис. 8. Вхідний запит студента (ліворуч) та згенероване завдання у вигляді JupyterNotebook в SMSE (праворуч)

Джерело: власна розробка.

Висновки. У роботі вперше запропоновано формалізовані моделі персоналізованого навчання в цифровому освітньому середовищі, зокрема модель персонального ШІ-асистента, побудована на основі BDI-парадигми, що дозволяє формалізувати процес прийняття рішень інтелектуальним агентом при генерації практичних завдань. Розроблено концептуальну модель інформаційної технології, яка забезпечує інтеграцію процесів генерації, виконання та перевірки завдань у межах єдиної системи. Запропоновано підхід до поєднання генеративного ШІ з доменно-орієнтованою мовою LTDL, що забезпечує структурну коректність результатів генерації.

Реалізовано мультиагентну систему генерації та підтримки виконання персоналізованих практичних завдань із використанням технологій Flowise, LangChain, JupyterNotebook та Docker. Забезпечено інтеграцію з LMS Moodle через розроблений програмний плагін, що дозволяє автоматизувати повний життєвий цикл завдання - від генерації до верифікації результатів. Запропонований підхід може бути використаний для масштабування практичного навчання у підготовці IT-фахівців та підвищення ефективності освітнього процесу.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження доцільно спрямувати на експериментальну валідацію ефективності запропонованих моделей у різних освітніх середовищах, адаптацію під різні інженерні дисципліни, а також розширення інтеграції з сучасними генеративними моделями. Окрему увагу планується приділити вдосконаленню механізмів контролю та відтворюваності генерації навчальних завдань.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті.

Автори використали ШІ (Chat GPT) для покращення читабельності та виправлення стилістичних і граматичних помилок у цій статті. Після використання цього інструменту автори переглянули та відредагували зміст за потреби і взяли на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Holdgraf, Chris & Culich, Aaron & Rokem, Ariel & Deniz, Fatma & Alegro, Maryana & Ushizima, Daniela. (2017). Portable learning environments for hands-on computational instruction: Using container- and cloud-based technology to teach data science. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1703.04900.

2. Хижняк А., Милиця А., Казнадій С., Горваль Д., Бобришев Є. Проблеми та перспективи сучасного практичного навчання інженерів. Львівський науковий форум. Матеріали XVII міжнародної науково-практичної конференції «Пріоритетні напрями досліджень в науковій та освітній діяльності». 9-10 січня 2026 року (с. 49-53).

3. Vorotnykova, I., Dziabenko, O., & Morze, N.(2025). Perspectives of implementation of personalized learning using artificial intelligence in higher education. *Information Technologies and Learning Tools*, 105(1), 144-157. DOI: https://doi.org/10.33407/itlt.v105i1.5893

4. Khyzhniak A. V., Kazymyr V. V. (2025). Analysis of methods for supporting personalization in IT education. *Herald of Advanced Information Technology,* 8(3), 366–381. https://doi.org/10.15276/hait.08.2025.24.

5. Mollie Jordan - Need a Programming Exercise Generated in Your Native Language? ChatGPT's Got Your Back: Automatic Generation of Non-English Programming Exercises Using OpenAI GPT-3.5 Mollie Jordan" https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3626252.3630897

6. Jacobs, Sven & Peters, Henning & Jaschke, Steffen & Kiesler, Natalie. (2025). Unlimited Practice Opportunities: Automated Generation of Comprehensive. *Personalized Programming Tasks* (pp. 319-325). doi.10.1145/3724363.3729089.

7. Evanfiya Logacheva, Arto Hellas, James Prather, Sami Sarsa, and Juho Leinonen. 2024. Evaluating Contextually Personalized Programming Exercises Created with Generative AI. In Proceedings of the *2024 ACM Conference on International Computing Education Research* (Vol. 1, 95–113). (ICER '24). ACM, New York, NY, USA. doi:10.1145/3632620.3671103.

8. Roe, J., & Perkins, M. (2024). Generative AI in self-directed learning: a scoping review. arXiv preprint arXiv:2411.07677. https://arxiv.org/abs/2411.07677

9. Halaweh, Mohanad. (2023). ChatGPT in education: Strategies for responsible implementation. *Contemporary Educational Technology*. 15.10.30935/cedtech/13036.

10. Alkafaween, U., Albluwi, I., & Denny, P. (2025). Automating autograding: Large language models as test suite generators for introductory programming. *Journal of Computer Assisted Learning*, 41(1), e13100. https://doi.org/10.1111/jcal.13100.

11. Ichida, A.Y., & Meneguzzi, F. (2023). Modeling a Conversational Agent using BDI Framework. Proceedings of the 38th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing.

12. Casali, A., Godo, L., & Sierra, C. (2006, August). Modeling travel assistant agents: a graded bdi approach. In IFIP *International Conference on Artificial Intelligence in Theory and Practice* (pp. 415-424). Boston, MA: Springer US.

13. Blair Archibald, Michele Sevegnani, Mengwei Xu. (2025). Modelling and verifying BDI agents under uncertainty. *Science of Computer Programming, 242,* 103254. https://doi.org/10.1016/j.scico.2024.103254.

14. Nowakowski, Grzegorz & Telenyk, Sergii & Vovk, Yevhenii. (2023). Chatbots Lifecycle Support Platform. Proceedings of the *IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, IDAACSConference Paper* 2023 (pp 308-319). https://doi.org/10.1109/IDAACS58523.2023.10348794.

15. Zabasta, A., Kazymyr, V., Kunicina, N., Velihorskyi, O. (2024). Digital Learning Ecosystem: Online Concept for Engineering Education . 2024 IEEE 65th Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2024 - Proceedings.

16. Khyzhniak A. V., Kazymyr V. V. (2025). Integrated task generation, execution, and assessment methods for enhancing personalized learning. *Nauka i tehnica syogodni, 13*(54), 1650-1664. https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-13(54)-1650-1664.

17. Хижняк, А., Казимир, В. (2025). Доменно-орієнтована мова опису персоналізованих практичних завдань для інженерних спеціальностей. *Технічні науки та технології,* (3(41)), 261–271. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-261-271.

18. Jurado, Francisco & Rodríguez, Francy & Chavarriaga, Enrique & Rojas, Luis. (2025). Blending Language Models and Domain-Specific Languages in Computer Science Education. A Case Study on API RESTFul. International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence. 9. 86-104. 10.9781/ijimai.2025.09.005.r.

19. Paul Denny, Juho Leinonen, James Prather, Andrew Luxton-Reilly, Thezyrie Amarouche, Brett A. Becker, and Brent N. Reeves. 2024. Prompt Problems: A New Programming Exercise for the Generative AI Era. In Proceedings of the 55th ACM Technical Symposium on Computer Science Education V. 1 (SIGCSE 2024). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 296–302. https://doi.org/10.1145/3626252.3630909.

20. Kazymyr, V., Horval, D., Drozd, O., Zabašta, A. (2023). Shared Modeling and Simulation Environment for Online Learning with Moodle and Jupyter. In: Shkarlet, S., et al. Mathematical Modeling and Simulation of Systems. MODS 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 667. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30251-0_11.

21. Yuvzhenko D., Chymshyr V., Shymkovych V., Znova K., Nowakowski G., Telenyk S. (Sep. 2025). A Multimodal Retrieval-Augmented Generation System with ReAct Agent Logic for Multi-Hop Reasoning. *Inf. Comput. and Intell. syst. j., 6*, 42–57.

22. Zabasta, A., Kazymyr, V., Drozd, O., Verslype, S., Espeel, L., & Bruzgiene, R. (2024). Development of Shared Modeling and Simulation Environment for Sustainable e-Learning in the STEM Field. *Sustainability*, *16*(5), 2197. https://doi.org/10.3390/su16052197.

References

1. Holdgraf, Chris & Culich, Aaron & Rokem, Ariel & Deniz, Fatma & Alegro, Maryana & Ushizima, Daniela. (2017). Portable learning environments for hands-on computational instruction: Using container- and cloud-based technology to teach data science. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1703.04900.

2. Хижняк А., Милиця А., Казнадій С., Горваль Д., Бобришев Є. Проблеми та перспективи сучасного практичного навчання інженерів. Львівський науковий форум. Матеріали XVII міжнародної науково-практичної конференції «Пріоритетні напрями досліджень в науковій та освітній діяльності». 9-10 січня 2026 року (с. 49-53).

3. Vorotnykova, I., Dziabenko, O., & Morze, N.(2025). Perspectives of implementation of personalized learning using artificial intelligence in higher education. *Information Technologies and Learning Tools*, 105(1), 144-157. DOI: https://doi.org/10.33407/itlt.v105i1.5893

4. Khyzhniak A. V., Kazymyr V. V. (2025). Analysis of methods for supporting personalization in IT education. *Herald of Advanced Information Technology,* 8(3), 366–381. https://doi.org/10.15276/hait.08.2025.24.

5. Mollie Jordan - Need a Programming Exercise Generated in Your Native Language? ChatGPT's Got Your Back: Automatic Generation of Non-English Programming Exercises Using OpenAI GPT-3.5 Mollie Jordan" https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3626252.3630897

6. Jacobs, Sven & Peters, Henning & Jaschke, Steffen & Kiesler, Natalie. (2025). Unlimited Practice Opportunities: Automated Generation of Comprehensive. *Personalized Programming Tasks* (pp. 319-325). doi.10.1145/3724363.3729089.

7. Evanfiya Logacheva, Arto Hellas, James Prather, Sami Sarsa, and Juho Leinonen. 2024. Evaluating Contextually Personalized Programming Exercises Created with Generative AI. In Proceedings of the *2024 ACM Conference on International Computing Education Research* (Vol. 1, 95–113). (ICER '24). ACM, New York, NY, USA. doi:10.1145/3632620.3671103.

8. Roe, J., & Perkins, M. (2024). Generative AI in self-directed learning: a scoping review. arXiv preprint arXiv:2411.07677. https://arxiv.org/abs/2411.07677

9. Halaweh, Mohanad. (2023). ChatGPT in education: Strategies for responsible implementation. *Contemporary Educational Technology*. 15.10.30935/cedtech/13036.

10. Alkafaween, U., Albluwi, I., & Denny, P. (2025). Automating autograding: Large language models as test suite generators for introductory programming. *Journal of Computer Assisted Learning*, 41(1), e13100. https://doi.org/10.1111/jcal.13100.

11. Ichida, A.Y., & Meneguzzi, F. (2023). Modeling a Conversational Agent using BDI Framework. Proceedings of the 38th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing.

12. Casali, A., Godo, L., & Sierra, C. (2006, August). Modeling travel assistant agents: a graded bdi approach. In IFIP *International Conference on Artificial Intelligence in Theory and Practice* (pp. 415-424). Boston, MA: Springer US.

13. Blair Archibald, Michele Sevegnani, Mengwei Xu. (2025). Modelling and verifying BDI agents under uncertainty. *Science of Computer Programming, 242,* 103254. https://doi.org/10.1016/j.scico.2024.103254.

14. Nowakowski, Grzegorz & Telenyk, Sergii & Vovk, Yevhenii. (2023). Chatbots Lifecycle Support Platform. Proceedings of the *IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, IDAACSConference Paper* 2023 (pp 308-319). https://doi.org/10.1109/IDAACS58523.2023.10348794.

15. Zabasta, A., Kazymyr, V., Kunicina, N., Velihorskyi, O. (2024). Digital Learning Ecosystem: Online Concept for Engineering Education. 2024 IEEE 65th *Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University*, RTUCON 2024 - Proceedings.

16. Khyzhniak A. V., Kazymyr V. V. (2025). Integrated task generation, execution, and assessment methods for enhancing personalized learning. *Nauka i tehnica syogodni, 13*(54), 1650-1664. https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-13(54)-1650-1664.

17. Khyzhniak, A., Kazymyr, V. (2025). Domenno-oriientovana mova opysu personalizovanykh praktychnykh zavdan dlia inzhenernykh spetsialnostei [Domain-oriented language for describing personalized practical tasks for engineering specialties]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical Sciences and Technologies,* (3(41)), 261–271. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-261-271.

18. Jurado, Francisco & Rodríguez, Francy & Chavarriaga, Enrique & Rojas, Luis. (2025). Blending Language Models and Domain-Specific Languages in Computer Science Education. A Case Study on API RESTFul. *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence, 9*, 86-104. 10.9781/ijimai.2025.09.005.r.

19. Paul Denny, Juho Leinonen, James Prather, Andrew Luxton-Reilly, Thezyrie Amarouche, Brett A. Becker, and Brent N. Reeves. 2024. Prompt Problems: A New Programming Exercise for the Generative AI Era. In Proceedings of the 55th ACM Technical Symposium on Computer Science Education V. 1 (SIGCSE 2024). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 296–302. https://doi.org/10.1145/3626252.3630909.

20. Kazymyr, V., Horval, D., Drozd, O., Zabašta, A. (2023). Shared Modeling and Simulation Environment for Online Learning with Moodle and Jupyter. In: Shkarlet, S., et al. Mathematical Modeling and Simulation of Systems. MODS 2022. *Lecture Notes in Networks and Systems, 667*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30251-0_11.

21. Yuvzhenko D., Chymshyr V., Shymkovych V., Znova K., Nowakowski G., Telenyk S. (Sep. 2025). A Multimodal Retrieval-Augmented Generation System with ReAct Agent Logic for Multi-Hop Reasoning. *Inf. Comput. and Intell. syst. j., 6*, 42–57.

22. Zabasta, A., Kazymyr, V., Drozd, O., Verslype, S., Espeel, L., & Bruzgiene, R. (2024). Development of Shared Modeling and Simulation Environment for Sustainable e-Learning in the STEM Field. *Sustainability*, *16*(5), 2197. https://doi.org/10.3390/su16052197.

Дата першого надходження статті до видання: 19.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 08.01.2026

UDC 004.42:37.091.3:378.018.43

Andrii Khyzhniak[1], Volodymyr Kazymyr[2]

[1]PhD student, Senior Lecturer at Information and Computer Systems Department
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: alf.andrey@gmail.com. **ORCID**: http://orcid.org/0009-0008-8655-3736

[2]Doctor of Sciences, Professor, Professor of the Department of Information and Computer Systems
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: vvkazymyr@gmail.com. **ORCID**: https://orcid.org/0000-0001-8163-1119. **ResearcherID**: Q-2925-2016

MODELS OF PERSONALIZED LEARNING IN THE DIGITAL EDUCATIONAL ENVIRONMENT

This paper addresses the problem of personalization of practical learning in digital educational environments, particularly in the context of IT education. It is shown that existing approaches to organizing practical tasks are fragmented, insufficiently formalized, and do not provide full integration of task generation, execution, and assessment processes, which limits the adaptability of learning and the effective use of artificial intelligence.

The aim of the study is to develop and describe formal models of personalized learning and to implement them within an information technology framework that automates the lifecycle of practical tasks.

A model of a personal AI assistant based on the Belief–Desire–Intention (BDI) paradigm is proposed. The model formalizes the decision-making process of an intelligent agent in a digital learning environment by incorporating course context, student learning history, and task performance results. This enables adaptive generation of personalized practical tasks. The task is represented as a structured entity consisting of context, data, goals, and execution environment components.

A conceptual model of the information technology is developed, integrating task creation, execution, and verification into a unified system. The approach uses a domain-specific language (LTDL) for formal task description, ensuring syntactic correctness and enabling automated validation. Task generation is performed using generative AI constrained by a formal grammar, combining flexibility with guaranteed structural correctness.

Functional modeling of the system is carried out using the IDEF0 methodology, which allows formalization of key processes: task definition, student request processing, learning environment deployment, and result verification. A multi-agent architecture is proposed to support task generation, student assistance, and automated evaluation.

The implementation includes a system of AI agents built with Flowise, LangChain, JupyterNotebook and Docker, as well as integration with the Moodle LMS via a custom plugin. A Retrieval-Augmented Generation (RAG) approach with a vector database is used to provide context-aware student support.

Keywords: *personalized learning; practical tasks; digital learning environment; artificial intelligence; RAG; formal systems; formal models; information technology.*

Fig.: 8. References: 22.

Хижняк А. В., Казимир В. В. Моделі персоналізації навчання в цифровому освітньому середовищі. *Технічні науки та технології,* 2026. № 1(43). С. 279-290. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-279-290.

РОЗДІЛ ІІІ. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-291-299
УДК 549.731.11

Лілія Анатоліївна Фролова [1], ***Надія Ігорівна Прокопенко*** [2]

[1]доктор технічних наук, професор кафедри технології неорганічних речовин та екології
Український державний університет науки і технологій (Дніпро, Україна)
E-mail: 19kozak83@gmail.com. **ORCID** https://orcid.org/0000-0001-7970-2264. **ResearcherID:** 55505810700

[2]аспірантка кафедри технології неорганічних речовин та екології
Український державний університет науки і технологій (Дніпро, Україна)
E-mail: nadya.prokopenko23@gmail.com. **ORCID** https://orcid.org/0009-0002-9862-0613. **ResearcherID:** PII-7991-2026

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ПЛАЗМОВОГО СИНТЕЗУ НА ПОГЛИНАЛЬНІ ТА МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ ФЕРИТУ КОБАЛЬТУ

У роботі досліджено синтез фериту кобальту плазмохімічним методом. Визначено вплив pH реакційного середовища, температури і тривалості обробки на значення намагніченості насичення, коефіцієнту поглинання електромагнітного випромінювання, тангенсу куту втрат, резонансне поле на ЕПР спектрі за допомогою повного факторного експерименту. Значення функцій відгуку визначали з результатів, отриманих методом рентгенофазового аналізу, вібраційної магнітометрії, електронного парамагнітного резонансу. Статистичний аналіз дав змогу кількісно оцінити вплив параметрів синтезу на обрані функції відгуку. Результати показали, що pH реакційного середовища є параметром, який найбільше впливає на намагніченість насичення порошків фериту кобальту, отриманих плазмохімічним методом. Найбільші значення коефіцієнта поглинання електромагнітного випромінювання відповідають ферриту кобальту, отриманому при збільшенні температури та часу обробки.

***Ключові слова**: ферит кобальту; плазмохімічний синтез; рентгенофазовий аналіз; повний факторний експеримент; намагніченість насичення; коефіцієнт поглинання.*

Рис.: 4. Табл.: 3. Бібл.: 9.

Актуальність теми дослідження. Величезний попит на нанорозмірні ферити зумовлений їх специфічними фізико-хімічними властивостями [1]. Серед шпінельних феритів $CoFe_2O_4$ посідає особливе місце завдяки високим значенням коерцитивної сили, намагніченості насичення, механічних показників, хімічній стабільності, що дає змогу використовувати матеріал у багатьох сферах техніки [2]. Ферит кобальту широко використовується у медицині, каталітичних процесах, електронних приладах, сенсорах [3].

Постановка проблеми. При отриманні фериту кобальту з певними характеристиками неодмінно постає задача вибору оптимальних технологічних схем та умов синтезу. Відомо, що саме процеси, які відбуваються в рідкій фазі, дають змогу отримати продукти з покращеними функціональними властивостями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз літературних джерел показав ефективне використання золь-гель технології, співосадження, керамічної технології, сольвотермального синтезу [4]. Визначення параметрів, які мають певний вплив на процес синтезу, а також оптимальні значення таких параметрів, є вирішальним для отримання $CoFe_2O_4$ з контрольованим фазовим складом і структурними показниками. Наприклад, ферити кобальту, що отримані трьома способами (співосадження з водних розчинів, співосадження в середовищі мікроемульсій та термічне розкладання металоорганічних комплексів), мають різний ступінь оберненості шпінелі тобто магнітні властивості визначаються саме обраною методикою синтезу[5]. Дослідження впливу температури відпалу при отриманні фериту кобальту показали, що максимум коерцитивної сили (1654,25 Ерстед) спостерігався для зразка, відпаленому за 2 години і при найнижчій температурі (550 °C) [6].

© Л. А. Фролова, Н. І. Прокопенко, 2026

Автори [7] встановили, що значення намагніченості насичення для наночастинок, отриманих різними методами, знаходяться в діапазоні від 49 до 95 А $м^2$/кг через відмінності в стехіометрії, розподілі катіонів за підґратками. Причому варіації густини дефектів і форми нанокристалів визначають розподіл полів перемикання та ефективну магнітну анізотропію, яка досягає ≈1 × 10^7 Ерг $см^{-3}$ для наночастинок фериту кобальту розміром 9 нм, покритих олеїновою кислотою.

При використанні гідротермального методу з підвищенням температури відпалу як намагніченість насичення, так і залишкова намагніченість збільшувалися, тоді як коерцитивна сила зменшувалася, що пов'язано з переходом від однодоменної до багатодоменної структури при перетині критичного розміру ~40 нм [8]. Схожа залежність встановлена також у роботі [9]. Автори розглянули залежність структурних і магнітних властивостей співосадженого фериту кобальту від температури прожарювання. З підвищенням температури прожарювання розмір кристалітів збільшується. Крім того, результати рентгенофазового аналізу вказують, що перерозподіл катіонів відбувається зі збільшенням температури прожарювання. У результаті намагніченість насичення зростає з температурою прожарювання, досягаючи 62,30 А $м^2$/кг.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що питання вибору оптимальної рідкофазної технології є надзвичайно важливим. Використання плазмової технології, що відрізняється екологічністю, відсутністю додаткових реагентів та короткотривалістю впливу на розчин є перспективним. Тобто попри велику кількість робіт, що присвячені удосконаленню технологій синтезу фериту кобальту, на теперішній час немає достатньої інформації щодо розгляду цього наукового питання. Необхідні залежності можна отримати, виконавши планування експериментів, що дозволяє оцінити вплив декількох факторів одночасно на функцію відгуку.

Метою статті є дослідження синтезу фериту кобальту плазмохімічним методом та вивченні впливу параметрів синтезу на коефіцієнти поглинання електромагнітного випромінювання, фазовий склад і магнітні властивості.

Виклад основного матеріалу. Отримання зразків здійснювалося шляхом зливання при безперервному перемішуванні відповідної суміші 0,5 М розчинів кобальт(II) сульфату, ферум(II) сульфату з необхідним мольним співвідношенням катіонів кобальту до феруму. Необхідне pH отримували шляхом додавання розчину 1М NaOH, з подальшою обробкою плазмовим розрядом.

Концентрація катіонів кобальту визначалася комплексонометрично, катіонів феруму-перманганатним і біхроматним методами. Для контролю ходу реакції реактор був забезпечений електродною системою, що включає в себе скляний електрод ЕСЛ 43-07 для вимірювання pH, платиновий електрод для вимірювання окисно-відновного потенціалу і електрод порівняння ЕВЛ-1М3. Всі осади промивалися до негативної реакції на сульфат-іон. Після витримки осад відокремлювали шляхом магнітної сепарації. Відмиті і відфільтровані осади сушили за температури 130°С. Відносні магнітні властивості визначалися вібраційним магнітометром. Намагніченість насичення визначали з побудованої петлі гістерезису. *Рентгенофазовий аналіз проводили на рентгеновському дифрактометрі ДРОН-3 в монохроматизованому Co-K_α випромінюванні (λ=1.7902 А). Ідентифікацію сполук проводили шляхом порівняння міжплощинних розташувань (d, А) і відносних інтенсивностей експериментальної кривої за даними електронної картки PCPDFWIN. Зйомка проводилась на кутах 10-90 град. Фазовий аналіз проводився з кроком 0,1 град, тривалість 5 с. Вимірювання коефіцієнта поглинання для феритів проводилися за допомогою установки, що*

складалася з генератора Г4-83, аналізатора спектра С4-11 та біконічного резонатора. Вимірювання проводилися на частоті 10^{10} Гц за температури 20 °С.

Спектри ЕПР були отримані за допомогою радіоспектрометра Radiopan SE/X-2543. Для характеристики сигналів ЕПР використовували резонансне поле.

На підставі попередніх експериментів, нами були обрані в якості основних технологічних параметрів, що впливають на магнітні властивості, вихідне pH розчину, час обробки *плазмовим розрядом*, температура проведення процесу. Як граничні умови були запропоновані наступні значення впливових чинників (табл. 1).

Таблиця 1 – Впливові фактори та їхні значення в реальному вигляді

Фактор	Назва	Одиниця вимірювання	Значення	
			максимум	мінімум
X_1	Температура	^{0}C	40	20
X_2	Час проведення процесу	хвил	20	5
X_3	pH		12,0	8,0

Був створений план повного трифакторного експерименту типу 2^3, для вивчення впливу параметрів синтезу на функціональні характеристики фериту кобальту, отриманого за допомогою плазмового розряду (таблиця 2).

Таблиця 2 - План проведення експериментів в кодованому та реальному вигляді

№	Закодовані значення параметрів			Реальні значення параметрів		
1	t	τ	pH	t	τ	pH
2	1	1	1	40	20	12
3	-1	1	1	20	20	12
4	1	-1	1	40	5	12
5	-1	-1	1	20	5	12
6	1	1	-1	40	20	8
7	-1	1	-1	20	20	8
8	1	-1	-1	40	5	8

У таблиці 2, (-1), (+1) являють собою закодовані значення коефіцієнтів для мінімального і максимального рівнів відповідно. На основі даних статистичного аналізу можна отримати математичну модель, що описує процес для обраних рівнів.

Для повного 3-факторного експерименту математичне рівняння, що описує цю систему, має вигляд:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{123} x_1 x_2 x_3$$

де yi - залежна змінна (функція відгуку)

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$- коефіцієнти, відповідні незалежним змінним,

$\beta_{12}, \beta_{23}, \beta_{13}$ - коефіцієнти при парних взаємодіях незалежних змінних,

β_{123} - коефіцієнт при потрійній взаємодії незалежних змінних.

Розрахунок моделей і подальша оптимізація були виконані за допомогою програми STATSGRAPHICS 10.0. Для отриманих моделей проводили перевірку значущості факторів, адекватності моделі за критерієм Фішера, аналіз дисперсії, аналіз діаграм Парето.

У таблиці 2 показана матриця для проведення повного факторного експерименту, яка використовується для вивчення впливу плазмового розряду на значення функцій відгуку (значення намагніченості насичення, коефіцієнт поглинання ЕМ випромінювання, тангенс куту втрат, резонансне поле на ЕПР спектрі), що отримані для закодованих умов, прийнятих в кожному досліді відповідно до порядкового номера зразків.

Таблиця 3 – Результати дослідження властивостей зразків, отриманих під дією плазмового розряду

№	Функція відгуку			
	Намагніченість насичення, M_s Ам^2/кг	Тангенс куту втрат електромагнітного випромінювання	Коефіцієнт поглинання, а, дБ	Резонансне поле на ЕПР спектрі, Hr,мТ
1	138,1	0,2	6,512	331,5
2	118,1	0,2	5,823	366,5
3	66,1	0,2	5,823	320
4	53,2	0,4	10,754	311
5	65,9	0,4	11,798	250,5
6	8,1	0,2	5,592	229,5
7	25,9	0,5	12,142	193
8	13,4	0,3	7,281	204,5

Закономірності зміни магнітних властивостей вивчали аналізуючи побудовані криві гістерезису. Магнітні характеристики наведено в таблиці 3 та рис. 1 (а,б,в,г). З рис. 1 видно, що висока намагніченість насичення (120-137 Ам^2/кг) може бути досягнута за підвищеної температури 40°С і часі обробки (зразки 1,2). Високе значення намагніченості насичення пов'язано з утворенням фериту кобальту з високою кристалічністю та великими розмірами кристалітів. Нижчі значення намагніченості насичення (8,0-14 Ам^2/кг) обумовлені утворенням немагнітних домішкових фаз оксидів та оксигідроксидів заліза (зразки 6,7,8). Статистична обробка показала, що коефіцієнт кореляції R^2 становив 0,99998, що підтверджує задовільний опис експериментальних даних.

Графік вірогідності значень (рис 1г) свідчить, що точки розташовані на прямій лінії, тобто дані розподілені нормально (відповідно до обраної моделі).

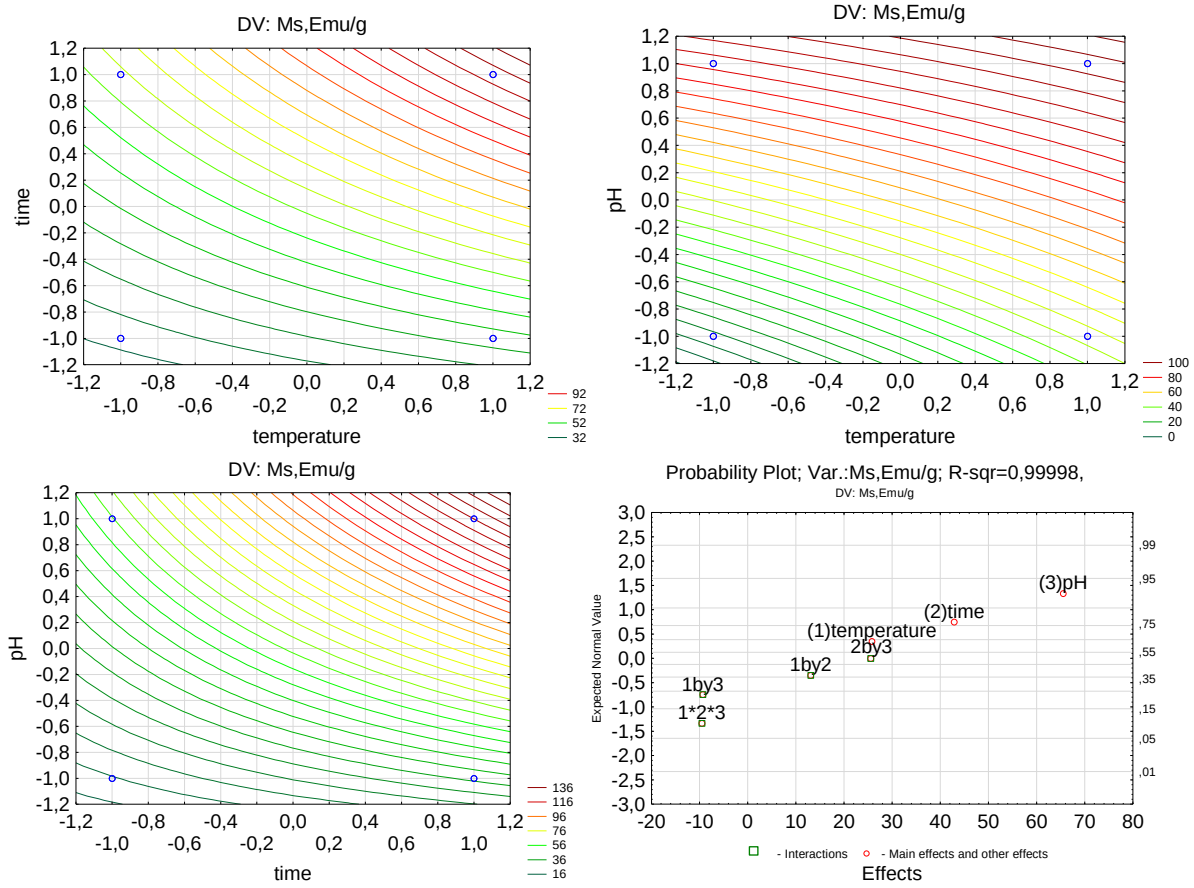


Рис. 1. Графіки залежності намагніченості насичення від параметрів синтезу а – Ms = f(t, τ), б – Ms = f(pH, t), в – Ms = f(pH, τ), г – графік вірогідності значень

Порівнюючи зразки, синтезовані при різних умовах, можна стверджувати, що зразки, синтезовані при максимальних рівнях часу обробки й температури, показали досить інтенсивне поглинання електромагнітного випромінювання на частоті 10 ГГц.

Ізолінії, що представлені на рис. 2, *а, б, в,* підтверджують, що ступінь поглинання збільшується при збільшенні температури, часу обробки. Причому найбільший вплив чинить саме значення температури. Рисунок 1, *г* показує задовільний збіг розрахованих та експериментальних значень функції відгуку.

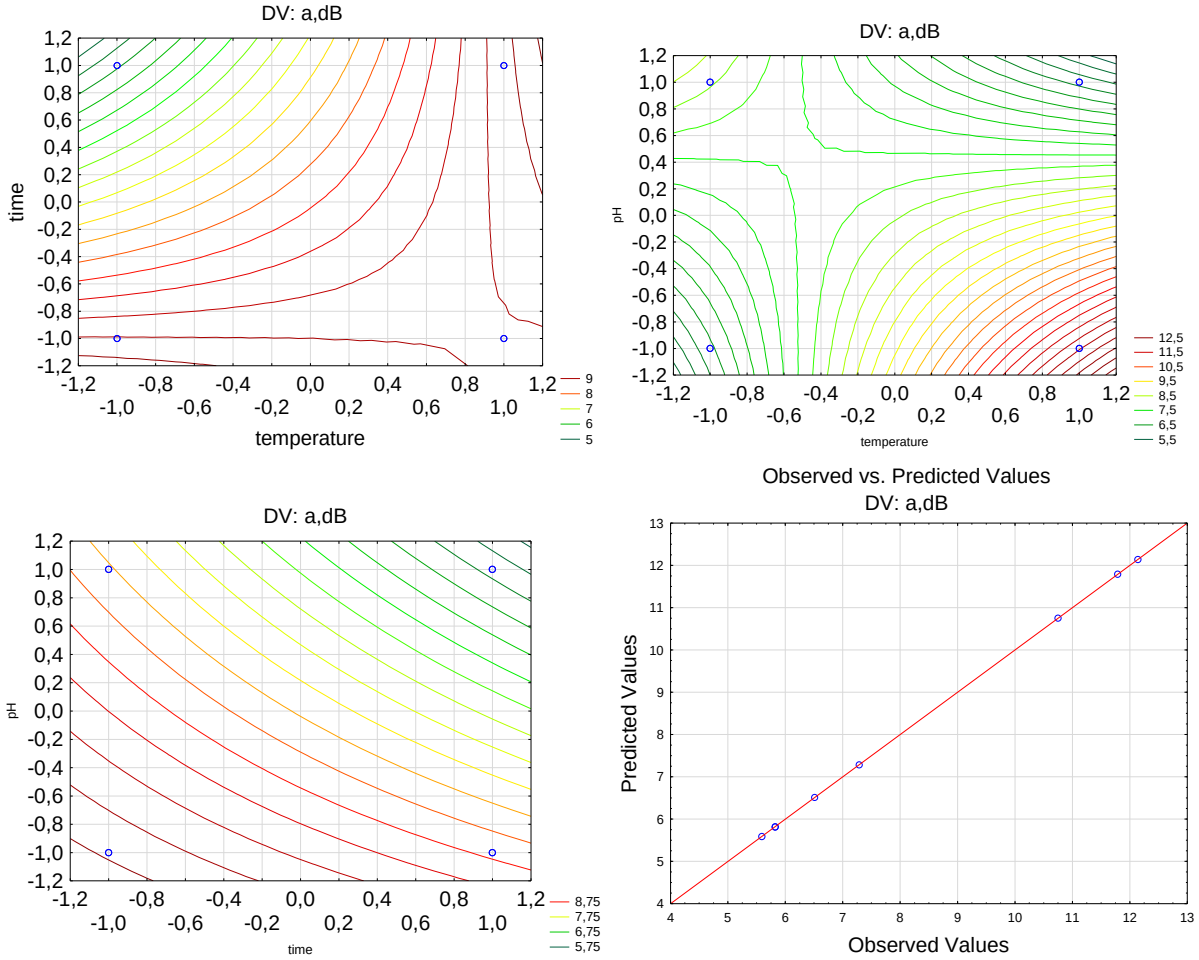


Рис. 2 Графіки залежності поглинання електромагнітного випромінювання від параметрів синтезу а-- а=f(t, τ) б-а=f(pH, t) в-а=f(pH, τ), г - спостережувані та прогнозовані значення

Аналіз залежностей тангенса куту втрат електромагнітного випромінювання (рис. 3) показує, що індивідуальні фактори (pH, час) мають істотний і негативний вплив, температура впливає на показник значно менше (3а). У разі комбінованих ефектів, лише взаємодія між часом обробки і температурою та між pH і температурою впливають на зміну тангенса куту втрат, причому взаємний вплив pH і температури дають негативний ефект.

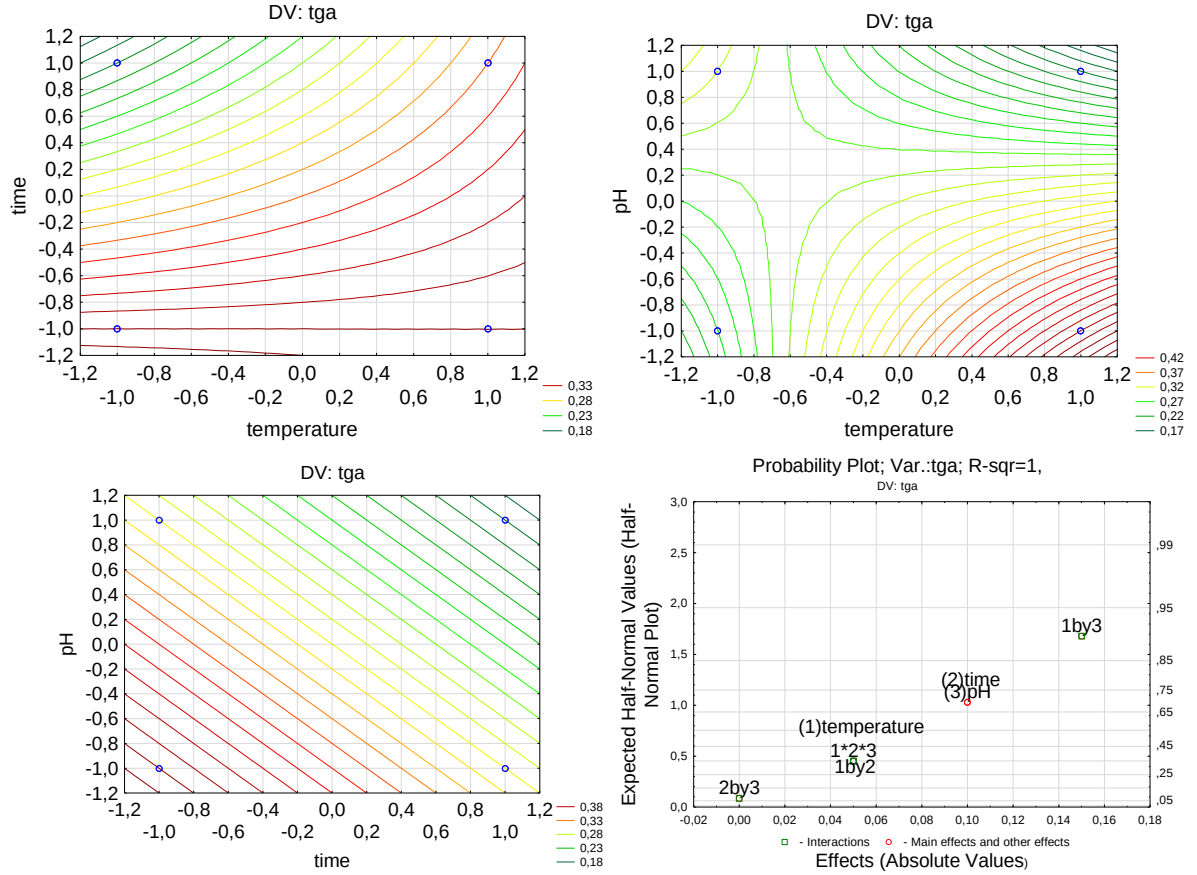
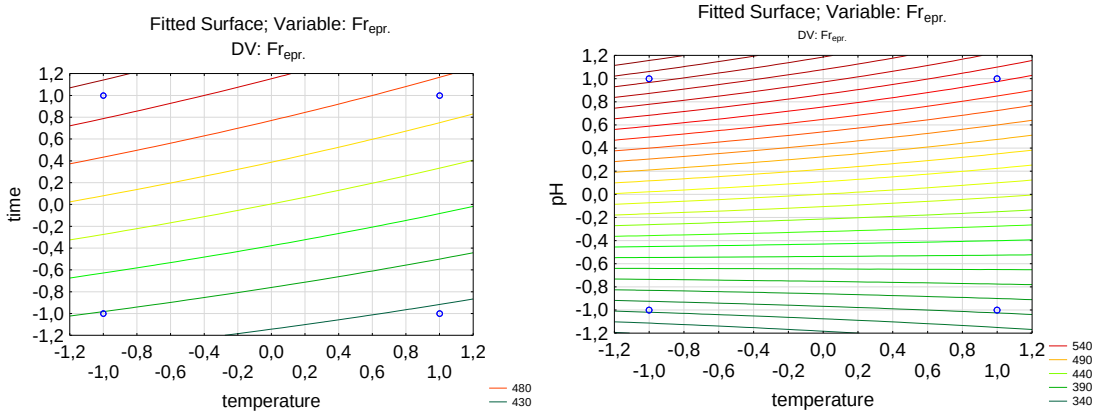


Рис. 3 Графіки залежності тангенсу кута втрат від параметрів синтезу а- Тг=f(t, τ) б- Тг =f(pH, t), в- Тг =f(pH, τ), г - графік вірогідності значень



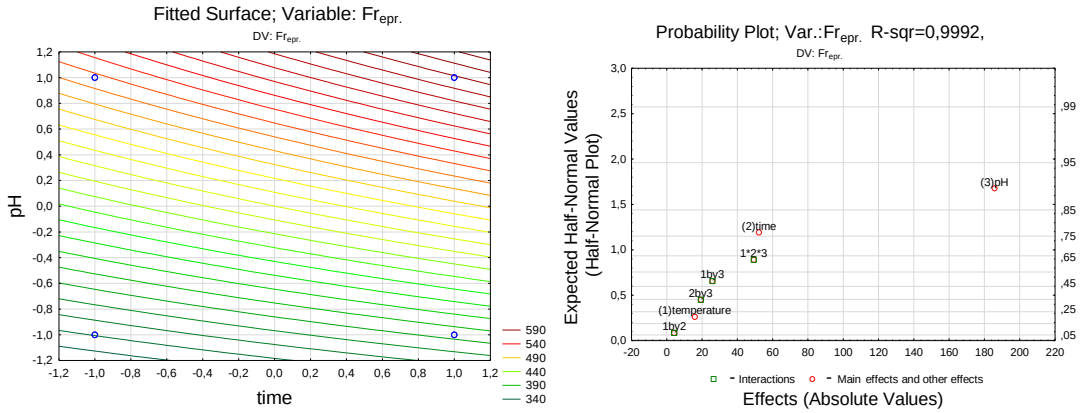


Рис. 4 Графіки залежності резонансного поля на ЕПР спектрі від параметрів синтезу а – Hr = f(t, τ); б – Hr = f(pH, t); в – Hr = f(pH, τ); г – графік вірогідності значень

Взаємний вплив змінних на резонансне поле ЕПР спектрів представлено за допомогою ізоліній на рис. 4. З рис. 4 видно, що контурні лінії мають незначну кривизну, що вказує на майже лінійну залежність між змінними (Hr =f(t, τ), Hr =f(pH, t),). За формою контурних ліній зниження pH реакційного середовища від рівня 0 до -1, а також зниження температури синтезу від рівня +1 до -1 призводить до утворення фериту із меншими значеннями тангенса, одночасне збільшення рівня цих змінних дає протилежний ефект. Аналізуючи рис. 3 в можна побачити, що існує майже лінійна залежність між тангенсом куту втрат та температурою та часом обробки. Найбільш впливовим фактором є pH середовища та час обробки плазмовим розрядом. На основі статистичного аналізу було визначено коефіцієнт кореляції, який становить $R^2 = 0,9992$ (рис. 4, *г*). Очевидно, що підвищені значення коефіцієнт поглинання відповідають нижчим значенням резонансного поля.

Висновки. За допомогою повного факторного експерименту було з'ясовано вплив параметрів синтезу на намагніченість насичення $CoFe_2O_4$, коефіцієнт поглинання ЕМ випромінювання, тангенс куту втрат, резонансне поле на ЕПР спектрі.

На основі аналізу кривих гістерезису показано, що високі значення намагніченості насичення (120-137 Ам^2/кг) можуть бути досягнуті за підвищеної температури 40°C і часі обробки. Це пов'язано з утворенням фериту кобальту з високою кристалічністю та великими розмірами кристалітів. Нижчі значення намагніченості насичення (8,0-14 А м^2/кг) обумовлені утворенням немагнітних домішкових фаз оксидів та оксигідроксидів заліза.

Отримані експериментально-статистичні залежності добре описують отримані експериментальні дані і можуть бути використані для проведення оптимізації плазмохімічного синтезу. Тобто дослідження впливу параметрів синтезу на структуру та магнітні властивості дозволяє ефективно використовувати плазмохімічний синтез для регулювання властивостей наночастинок $CoFe_2O_4$ для різноманітних застосувань.

Список використаних джерел

1. Goldman, A. (2006). *Modern ferrite technology*. Springer US.
2. Srivastava, R., & Yadav, B. C. (2012). Ferrite materials: Introduction, synthesis techniques, and applications as sensors. *International Journal of Green Nanotechnology, 4*(2), 141–1.
3. Tamboli, Q. Y., et al. (2023). Green synthesis of cobalt ferrite nanoparticles: An emerging material for environmental and biomedical applications. *Journal of Nanomaterials, 2023*, 9770212.
4. Frolova, L. A., et al. (2024). Novel methods of spinel ferrites production: Mini-review. *Journal of Chemistry and Technologies, 32*(3), 662–668.
5. Gyergyek, S., et al. (2010). Influence of synthesis method on structural and magnetic properties of cobalt ferrite nanoparticles. *Journal of Nanoparticle Research, 12*(4), 1263–1273.
6. Caldeira, L. E., et al. (2022). Correlation of synthesis parameters to the structural and magnetic properties of spinel cobalt ferrites ($CoFe_2O_4$): An experimental and statistical study. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 550*, 169128.

7. Tancredi, P., et al. (2022). Size and doping effects on the improvement of the low-temperature magnetic properties of magnetically aligned cobalt ferrite nanoparticles. *Journal of Alloys and Compounds, 894*, 162432.

8. Bououdina, M., et al. (2020). Dependence of structure/morphology on electrical/magnetic properties of hydrothermally synthesised cobalt ferrite nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 493*, 165703.

9. Ahmed, M. F., et al. (2025). Effect of calcination temperature on nano-cobalt ferrite synthesized by a sol–gel method for modification of its structural, morphological, magnetic, electrical and optical properties. *Materials Advances, 6*(19), 6724–6741.

References

1. Goldman, A. (2006). *Modern ferrite technology*. Boston, MA: Springer US.

2. Srivastava, R., & Yadav, B. C. (2012). Ferrite materials: introduction, synthesis techniques, and applications as sensors. *International Journal of Green Nanotechnology*, *4*(2), 141-154.

3. Tamboli, Q. Y., Patange, S. M., Mohanta, Y. K., Sharma, R., & Zakde, K. R. (2023). Green synthesis of cobalt ferrite nanoparticles: an emerging material for environmental and biomedical applications. *Journal of Nanomaterials*, *2023*(1), 9770212.

4. Frolova, L. A., Sknar, I. V., Mandryka, A. G., & Frolov, O. O. (2024). Novel methods of spinel ferrites production: mini-review. *Journal of Chemistry and Technologies*, *32*(3), 662-668.

5. Gyergyek, S., Makovec, D., Kodre, A., Arčon, I., Jagodič, M., & Drofenik, M. (2010). Influence of synthesis method on structural and magnetic properties of cobalt ferrite nanoparticles. *Journal of Nanoparticle Research*, *12*(4), 1263-1273.

6. Caldeira, L. E., Erhardt, C. S., Mariosi, F. R., Venturini, J., Zampiva, R. Y. S., Montedo, O. R. K., ... & Braganca, S. R. (2022). Correlation of synthesis parameters to the structural and magnetic properties of spinel cobalt ferrites ($CoFe_2O_4$)–an experimental and statistical study. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, *550*, 169128.

7. Tancredi, P., Rivas-Rojas, P. C., Moscoso-Londoño, O., Muraca, D., Knobel, M., & Socolovsky, L. M. (2022). Size and doping effects on the improvement of the low-temperature magnetic properties of magnetically aligned cobalt ferrite nanoparticles. *Journal of Alloys and Compounds*, *894*, 162432.

8. Bououdina, M., & Manoharan, C. (2020). Dependence of structure/morphology on electrical/magnetic properties of hydrothermally synthesised cobalt ferrite nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, *493*, 165703.

9. Ahmed, M. F., Yasmin, A., Biswas, B., Rahman, M. L., Khanam, J., Rakhi, R. J., ... & Sharmin, N. (2025). Effect of calcination temperature on nano-cobalt ferrite synthesized by a sol–gel method for modification of its structural, morphological, magnetic, electrical and optical properties. *Materials Advances*, *6*(19), 6724-6741.

Дата першого надходження статті до видання: 01.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.12.2025

UDC 549.731.11

Liliya Frolova[1], Nadiya Prokopenko[2]

[1]Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Inorganic Materials Technology and Ecology
Ukrainian State University of Science and Technology, (Dnipro, Ukraine)
E-mail: 19kozak83@gmail.com. **ORCID** https://orcid.org/0000-0001-7970-2264. **ResearcherID:** 55505810700

[2]Postgraduate Student, Department of Inorganic Materials Technology and Ecology
Ukrainian State University of Science and Technology, (Dnipro, Ukraine)
E-mail: nadya.prokopenko23@gmail.com. **ORCID** https://orcid.org/0009-0002-9862-0613. **ResearcherID:** PII-7991-2026

STUDY OF THE INFLUENCE OF PLASMA SYNTHESIS PARAMETERS ON THE ABSORPTION AND MAGNETIC PROPERTIES OF COBALT FERRITE

Cobalt ferrite is widely used in medicine, catalytic processes, electronic devices, sensors. When obtaining cobalt ferrite with certain characteristics, the task of choosing optimal technological schemes and synthesis conditions inevitably arises. The use of plasma technology, which is environmentally friendly, does not require additional reagents, and has a short duration of exposure to the solution, is promising.

The synthesis of cobalt ferrite by the plasma-chemical method was investigated in the work. The characterization of the ferrite series was performed using X-ray structural and X-ray phase analysis, vibrational magnetometry. Measurements of the absorption coefficient for ferrites were carried out using a setup consisting of a G4-83 generator, a C4-11 spectrum analyzer, and a biconical resonator. The measurements were carried out at a frequency of 1010 Hz at a temperature of 20 °C. Electron paramagnetic resonance (EPR) spectra were obtained using a Radiopan SE/X-2543 radio spectrometer.

The initial pH of the solution, the plasma discharge treatment time, and the process temperature were selected as the main technological parameters affecting the properties. A full factorial experiment was used to study the influence of the plasma discharge on the response function values (saturation magnetization value, electromagnetic radiation absorption coefficient, loss angle tangent, resonance field in the EPR spectrum).

Based on the analysis of hysteresis curves, it was shown that high saturation magnetization values (120-137 Emu/g) can be achieved at an elevated temperature of 40°C and treatment time. Lower saturation magnetization values (8.0-14 Emu/g) are due to the formation of non-magnetic impurity phases of iron oxides and oxyhydroxides.

Statistical analysis allowed to quantitatively assess the influence of synthesis parameters on selected response functions. The obtained experimental-statistical models describe the obtained experimental data well and are the basis for optimization of plasma-chemical synthesis. The study of the influence of synthesis parameters on absorption and magnetic properties allows to effectively use plasma-chemical synthesis to regulate the properties of $CoFe_2O_4$ nanoparticles for various applications.

Keywords: *cobalt ferrite, plasma-chemical synthesis, X-ray phase analysis, full factorial experiment, saturation magnetization, absorption coefficient.*

Fig.: 4. Table: 3. Bibliography: 9.

Фролова Л. А., Прокопенко Н. І. Дослідження впливу параметрів плазмового синтезу на поглинальні та магнітні властивості фериту кобальту. *Технічні науки та технології*, 2026. № 1(43). С. 291-299. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-291-299.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-300-308
УДК 663.94:663.26

Тетяна Геннадіївна Філінська[1], Олена Сергіївна Александрова[2], Антоніна Олександрівна Філінська[3]

[1]кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції
Український державний університет науки і технологій (Дніпро, Україна)
E-mail: f1l1nskaya@ukr.net. **ORSID:** https://orcid.org/0009-0009-7921-1989

[2]магістрант кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції
Український державний університет науки і технологій (Дніпро, Україна)
E-mail: lenaaleksandrova007@ukr.net

[3]старший викладач кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції
Український державний університет науки і технологій (Дніпро, Україна)
E-mail: antoniyafilin@ukr.net. **ORSID:** https://orcid.org/0009-0001-6975-6186

ПЕРСПЕКТИВНІ ДОБАВКИ РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ ДЛЯ КОНДИТЕРСЬКОЇ ГЛАЗУРІ

Харчова глазур широко використовуються у виробництві кондитерських виробів та інших харчових продуктів. Традиційні компоненти глазурі постійно доповнюються інноваційними інгредієнтами рослинного походження, що збагачують їх корисними нутрієнтами, слугують ефективними замінниками синтетичних добавок, покращують технологічні властивості. Актуальним залишається розширення асортименту кондитерської глазурі за рахунок використання як нетрадиційної сировини, так і вторинних продуктів харчової галузі.

Досліджено властивості порошків зі шкірок цитрусових і гранату, а також бананового і бататового борошна як добавок кондитерської глазурі. Виконані дослідження вологоутримуючої здатності добавок вказують на високу здатність утримувати вологу порошками зі шкірок різних видів цитрусових: помело (985 %), червоного грейпфруту (808 %), мандарина (701 %), апельсина (591 %), світі (575 %). Невеликі кількості (2-5 %) цих добавок в рецептурі глазурі слугують альтернативою харчовим синтетичним добавкам. Для бананового борошна, порошку зі шкірки граната, борошна з помаранчевого і фіолетового батату ці показники дещо нижчі (199-402 %), їхня частка в рецептурі рекомендована в більших кількостях (6-8 %). Введення добавок у вказаних кількостях забезпечує виготовлення глазурі з високими органолептичними характеристиками, і які задовольняють вимогам за такими показниками як вологість і температура плавлення.

Ключові слова: *добавки; цитрусові порошки; батат; банановe борошно; глазур.*
Рис.: 3. Бібл.: 19.

Актуальність теми дослідження. Кондитерський ринок України ще до 2022 року змінився в умовах системної економічної кризи: ключові гравці здали свої позиції, а покупці вже по-іншому почали підходити до вибору солодощів. Структура ринку виробництва кондитерської продукції в Україні не є сталою і частка в ній шоколадних, цукристих і борошняних виробів постійно змінюється [1]. У 2022 році обсяги виробництва кондитерської галузі впали майже на 26 %, але кількісні показники реалізації продукції мали незначне зменшення. Для борошняних кондитерських виробів, тортів і тістечок зменшення було на рівні 1,2 %, а обсяги реалізації какао, шоколаду та цукрових кондитерських виробів знизилися на 5,3 % [2]. За даними асоціації «Укркондпром» близько 40% української кондитерської продукції постачається на зовнішні ринки. Упродовж січня-вересня 2025 року обсяги експорту у натуральному вираженні збільшилися на 17,6%. Кондитерський ринок Європейського союзу (ЄС) є досить насиченим, що потребує від українських виробників розширення власного асортименту, а також приведення якості продукції до стандартів, які діють в ЄС та інших країнах. Тож актуальним на сьогодні є впровадження рецептурних інновацій за рахунок використання функціональних добавок підвищеної харчової цінності, з покращеними технологічними властивостями й безпечними для здоров'я споживачів.

Постановка проблеми. Харчова глазур широко використовуються у виробництві кондитерських виробів, морозива та інших харчових продуктів. Вони представлені у широкому асортименті й різного рецептурного складу. Традиційні компоненти глазурі постійно доповнюються інноваційними інгредієнтами рослинного походження, що збагачують їхніми корисними нутрієнтами, слугують ефективними замінниками синтетичних

© Т. Г. Філінська, О. С. Александрова, А. О. Філінська, 2026

Е-добавок, покращують технологічні властивості [3]. З метою зниження екологічного навантаження на довкілля виконуються дослідження щодо можливості використання відходів переробної промисловості в якості вторинної харчової сировини. Важливим є вивчення властивостей функціональних добавок і впливу їхньої кількості на характеристики отримуваної глазурі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Глазур є невід'ємною частиною багатьох кондитерських виробів, впливає не лише на зовнішній вигляд, а й на їх текстуру, смак та термін зберігання. Наповнювачі, що додаються до рецептурного складу глазурі, відіграють ключове значення у формуванні її показників якості. Вивчення властивостей і впливу добавок є важливим, оскільки розширення їх різноманіття дозволяє створювати продукти з поліпшеними характеристиками та підвищувати їх ринкову конкурентоспроможність. Глазур виготовляють із різних інгредієнтів, включаючи цукор, какао-порошок, молоко, жири, яйця, фрукти та ін. Виготовляють білу, кольорову, шоколадну глазур, з різним вмістом жиру й добавками. Використання глазурі сприяє наданню глянсового кольору, солодкого смаку та кремової або хрусткої текстури продуктам, а також забезпечує захист від дії вологи, світла і кисню повітря, що своєю чергою сприяє подовженню терміну придатності глазурованих кондитерських виробів. На сьогодні приділяється особлива увага дослідженням впливу температури та складу на реологічні властивості і здатність глазурі для харчових продуктів до стікання [4-7]. Ці чинники серед головних, які враховуються в технологічному процесі нанесення глазурі на вироби.

Присутність жирових компонентів у складі глазурі й у кондитерському виробі, на який наноситься глазур, потребує використання антиоксидантів. Ефективною заміною синтетичним Е-добавкам антиоксидантної дії можуть слугувати, наприклад продукти перероблення цитрусових [8, 9]. Антиоксидантні властивості виявляють також м'якоть, насіння та шкірка гранату. Остання до того ж з давніх часів використовувалася як барвник через високий вміст таніну та фенолів [10].

До перспективних рецептурних компонентів харчової глазурі можна віднести батат. Крохмаль кореня батату з унікальними фізико-хімічними властивостями є цінним функціональним харчовим інгредієнтом. Солодка картопля з жовтою та помаранчевою м'якоттю містить суміш фенольних кислот (гідроксикоричних кислот) і має відносно високий рівень каротиноїдів (β-каротину). Батат з фіолетовою м'якоттю має високий рівень ацильованих антоціанів та інших фенолів з антиоксидантною активністю. Антоціани фіолетового батату мають ароматичні ацильовані глікозильні групи й демонструють відносно високу стійкість до pH і термостабільність [11]. Фіолетовий та помаранчевий батат є цінним джерелом природних пігментів, які здатні надавати продуктам яскравий і привабливий колір, що може бути ефективною альтернативою штучним барвникам. Додавання такого борошна до глазурі не тільки дозволяє досягти насиченого кольору, але й може змінювати їхні реологічні показники та впливати на органолептичні характеристики.

Споживачі висувають все більше вимог до якості кольорової глазурі, особливо до її безпечності, і віддають переваги продукції без синтетичних компонентів. Натуральні барвники для харчових продуктів все частіше стають об'єктом дослідження і привертають увагу виробників [12; 13]. Розширення асортименту харчових природних барвників можливе за рахунок використання як джерела пігментів різної сировини: квітів (чорнобривці) [14], мікроорганізмів і водоростей [15]. Щоб кондитерські вироби зберігали свої органолептичні характеристики, природні барвники мають бути стійким до дії зовнішніх чинників (світла, тепла та ін.), не погіршувати свої якості як у технологічному процесі виготовлення глазурі, так і при нанесенні її на продукцію [16].

Сучасна харчова промисловість активно орієнтується на впровадження ресурсозберігаючих технологій і агропродовольчі побічні продукти розглядаються як джерело натуральних харчових добавок функціональної дії [17]. Побічні продукти, як правило, це вторинні продукти, отримувані в результаті первинного агропродовольчого виробництва, вони є цікавим та дешевшим джерелом функціональних інгредієнтів, таких як пептиди, каротиноїди та фенольні сполуки. Існуючий обсяг робіт показав, що побічні продукти та їхні екстракти можуть успішно включатися в харчові продукти, наприклад, фенольні сполуки з баклажанів можуть потенційно використовуватися як багатофункціональна харчова добавка з антимікробними, антиоксидантними властивостями і як харчовий барвник. Потенційні сфери застосування сполук побічних продуктів широкі: вони виявляють антиоксидантну та антимікробну дію; використовуються як згущувачі, барвники та ін.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Сучасний світ ставить перед харчовою промисловістю все більше викликів, пов'язаних із потребою у виробництві якісних, екологічно безпечних та натуральних продуктів. В умовах України, особливо важливо створювати продукти, які не лише відповідають внутрішнім потребам, а й здатні конкурувати на міжнародному ринку. Однією з ключових тенденцій глобального ринку харчових продуктів є перехід до натуральних інгредієнтів. Проведений аналіз останніх публікацій показав, що на сьогодні приділяється значна увага питанням використання добавок рослинного походження при виготовленні кондитерський глазурованих виробів. Актуальним залишається розширення асортименту кондитерської глазурі за рахунок використання як нетрадиційної сировини, так і вторинних продуктів харчової галузі, у тому числі відходів виробництв.

Метою статті є вивчення властивостей добавок рослинного походження та їх вплив на якісні характеристики глазурі, визначення оптимальних кількостей фруктово-овочевих порошків у складі глазурі для забезпечення її високих технологічних характеристик.

Виклад основного матеріалу. Для досліджень використовували висушену природним шляхом шкірку гранату і цитрусових (червоного грейпфрута, апельсину, мандарину, помело і світі) з вмістом вологи 8-9 %. Її подрібнювали і просіюванням через сита відділяли фракцію менш як 0,5 мм (рис. 1) Використання дрібної фракції не призводило до неоднорідності текстури харчової глазурі, що можливо при використанні фракцій більшого розміру.

а *б* *в* *г* *д* *є*

Рис. 1. Порошки зі шкірки гранату і цитрусових:
а – гранат; б – мандарин; в – апельсин; г – світі; д – помело; є – грейпфрут
Джерело: власна розробка.

Для кожного зразка визначили насипну густину вимірюванням маси встановленого об'єму порошку і показник вологоутримуючої здатності методом центрифугування [18]. Для цього у пробірку для центрифуги вносили наважку досліджуваного зразка й додавали визначену кількість дистильованої води. Вміст пробірки ретельно переміщували й

залишали у стані спокою на 30 хвилин для набухання зразка за температури 20-22 ºС, після чого пробірки центрифугували. Показник вологоутримуючої здатності у відсотках розраховували за формулою:

$$W = [(m_3 - m_2) / m_1] \cdot 100 \quad (1)$$

де W – вологоутримуюча здатність, %;
m_1 – маса наважки, г;
m_2 – маса пробірки з наважкою до зволоження, г
m_3 – маса пробірки з гідратованим зразком після центрифугування, г.

Результати виконаних досліджень (табл. 1) вказують на високу здатність зразків утримувати вологу.

Таблиця 1 – Вологоутримуюча здатність і насипна густина порошку зі шкірки граната і цитрусових

Назва зразка	Насипна густина, кг/м^3	Вологоутримуюча здатність, %
Порошок шкірки помело	176	985
Порошок шкірки червоного грейпфрута	204	808
Порошок шкірки мандарина	231	701
Порошок шкірки апельсина	213	591
Порошок шкірки світі	253	575
Порошок шкірки гранату	470	295

Високі гідроколоїдні властивості порошків зі шкірки цитрусових пояснюються тим, що разом зі значним вмістом волокон, в їх складі присутні структурні полісахариди (пектинові речовини, геміцелюлози, целюлози). Значний вміст протопектину в них зумовлює високі сорбційні властивості. Виготовлена глазур, що містить у складі какао-олію, кокосову олію, сухе молоко, цукор і порошки зі шкірки цитрусових, за показниками стабільності, в'язкості і плинності задовольняли вимогам до харчової глазурі. Оптимальна кількість порошку цитрусових і шкірки гранату на рівні 2-5 % незначною мірою впливала на колір глазурі, придавала їй цитрусовий присмак та аромат. Аналогічні дослідження виконали для зразків борошна фіолетового та помаранчевого батату й бананового борошна (рис. 2).

а *б* *в*

Рис. 2. Зразки борошна з батату та банану:
а – фіолетовий батат; б – помаранчевий батат; в – бананове борошно
Джерело: власна розробка.

Результати виконаних досліджень (табл. 2) вказують на дещо нижчу здатність зазначених зразків утримувати вологу у порівнянні з цитрусовими порошками. Це пояснює більшу оптимальну кількість вказаних компонентів у рецептурі харчової глазурі на рівні 6-8 %.

Таблиця 2 – Вологоутримуюча здатність і насипна густина борошна з батату та банану

Назва зразка	Насипна густина, кг/м^3	Вологоутримуюча здатність, %
Борошно фіолетового батату	642	213
Борошно помаранчевого батату	461	402
Бананове борошно	514	199

Додавання борошна з помаранчевого та фіолетового батату впливало на реологічні властивості глазурі, вони продемонстрували підвищену в'язкість. Це може бути зумовлено волокнистою структурою борошна, яка сприяє підвищенню густини та стабільності глазурі. Пластичність також зазнала змін, особливо при додаванні більшої кількості борошна. Глазур ставала менш текучою, з кращою здатністю утримувати форму, що є перевагою при створенні декоративних покриттів для кондитерських виробів. Важливими були також зміни кольору. Додавання борошна з помаранчевого батату забезпечувало глазурі насичений жовтогарячий відтінок, тоді як борошно з фіолетового батату надавало глазурі привабливий фіолетовий відтінок. Завдяки природним пігментам колір глазурі став більш яскравим та насиченим, що підвищувало її естетичну привабливість. Сенсорна оцінка показала, що глазур з бататовим борошном має трохи густішу текстуру, однак залишається приємною на сприйняття. Борошно забезпечувало гладкість і стабільність текстури, без появи грудочок або розшарування. Додавання бататового борошна суттєво не впливало на смакові властивості глазурі. Зразки набували легких нот солодкості та незначного присмаку батату.

Бананове борошно дає м'який жовтий відтінок і має солодкий смак. Воно підвищує харчову цінність продукту і виявляє здатність покращувати текстуру глазурі, надаючи їй кремовість. Шкірка гранату дає цікавий аромат і легкий червоний відтінок, хоча не так сильно впливає на колір. Порошок гранатової шкірки придає легкого кисло-солодкого смаку і може використовуватися для створення ароматизованих харчової глазурі.

Для дослідження було виготовлено глазур, що містила у своєму складі основні рецептурні компоненти: какао-олію (20-30 %), кокосову олію (15-18 %), іншу рафіновану рідку рослинну олію (10-12 %), цукор (26-40 %), сухе молоко (8-10 %). В базовій рецептурі (контрольний зразок) були: харчовий ароматизатор (2 %) і харчовий синтетичний барвник (3 %). Зразки з добавками рослинного походження містили 2-5 % порошків зі шкірки цитрусових і гранату (1 група) і 6-8% бататового і бананового борошна (2 група). Масова частка вологи у глазурі з функціональними добавками була дещо вищою ніж у контрольному зразку (табл. 3) але не перевищувала нормованого показника для цукрової глазурі [19]. Температура плавлення глазурі з добавками визначена в межах від 28 до 36 °С, що забезпечує належну текстуру, блиск та зручність використання. Температура плавлення кондитерської глазурі є ключовим параметром, що впливає на її споживчі властивості та застосування. Цей показник залежить від співвідношення компонентів глазурі, жирнокислотного складу та її структури, що дозволяє досягти ефективної в'язкості та знизити температуру плавлення для покращення споживчих якостей кондитерських виробів. Зниження температури плавлення забезпечує ефективну в'язкість, що позитивно впливає на смакові якості продукту.

Таблиця 3 – Температура плавлення і масова частка вологи в глазурі з функціональними добавками

Показник	Контрольний зразок	Глазур з добавками 1 групи	Глазур з добавками 2 групи
Масова частка вологи, %	1 – 3	3 – 5	3 – 6
Температура плавлення, °С	30 – 32	28 – 31	33 – 36

Для виробництва глазурі з добавками може бути запропонована така схема (рис. 3).

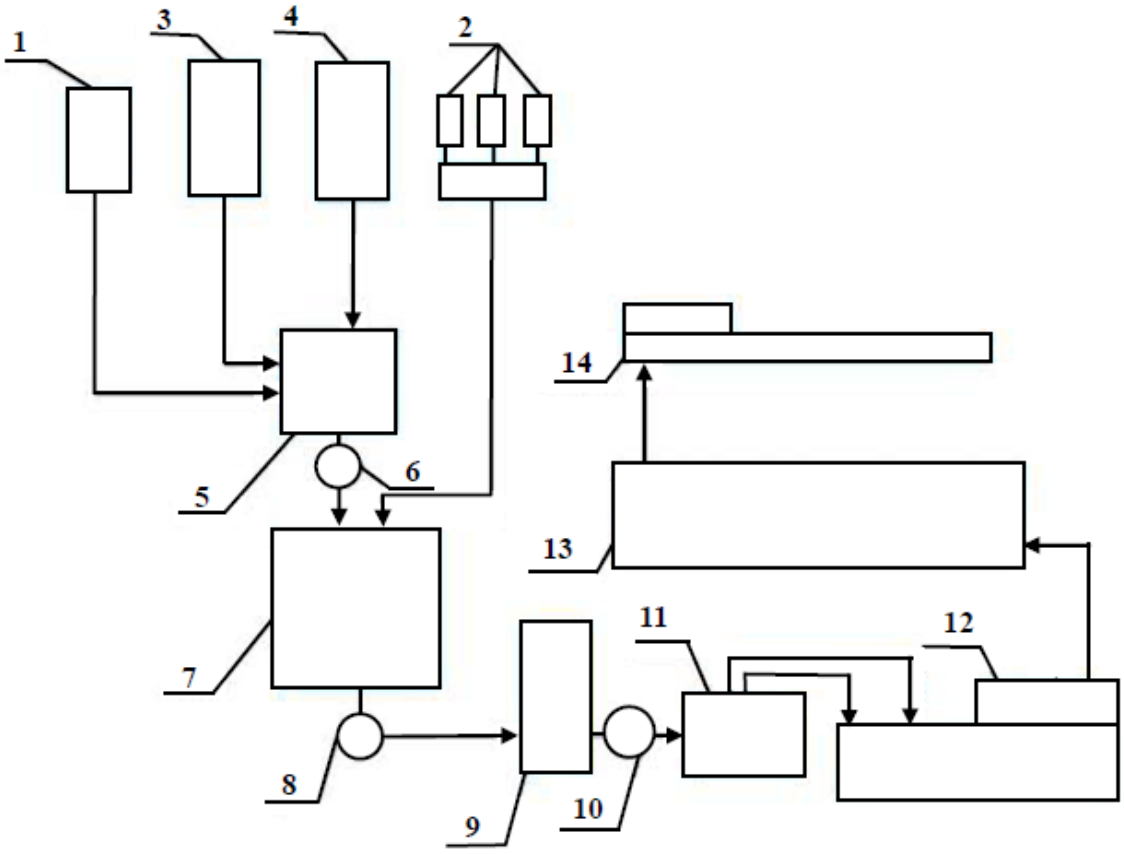


Рис. 3. Принципова схема виробництва глазурі з добавками:
1, 3, 4 – приймальні баки для жирових компонентів; 2 – бункери для цукру, сухого молока і добавок; 5 – змішувач з обігрівом; 6, 8, 10 – насоси;
7 – гомогенізатор; 9 – холодильник, 11 – дозатор з фільтром, 12 – формуюча лінія, 13 – холодильник, 14 – пакувальна машина.

Джерело: власна розробка.

Висновки. На підставі викладеного матеріалу можемо зробити висновок щодо можливості використання порошків зі шкірки цитрусових і граната, а також борошна з батату і банану, як добавок до кондитерської глазурі. Виконані дослідження вологоутримуючої здатності добавок вказують на високу здатність утримувати вологу порошками зі шкірок різних видів цитрусових: помело (985 %), червоного грейпфрута (808 %), мандарина (701 %), апельсина (591 %), світі (575 %). Невеликі кількості (2-5 %) цих добавок в рецептурі глазурі слугують альтернативою харчовим синтетичним добавкам. Для банановго борошна, порошку зі шкірки граната і борошна з помаранчевого і фіолетового батату ці показники дещо нижчі (199-402 %), їхня частка в рецептурі рекомендована в більших кількостях (6-8 %). Введення добавок у вказаних кількостях забезпечує виготовлення глазурі з високими органолептичними характеристиками, які задовольняють вимогам за такими показниками як масова частка вологи і температура плавлення глазурі.

Список використаних джерел

1. Razumova, H., & Oscoma, O. (2021). Confectionery market of Ukraine: analysis and prospects of development. *Primedia ELaunch LLC*, 83–91. https://doi.org/10.36074/tmafmseoid.ed-2.07.

2. Filinska, T., Aleksandrova, O., & Filinska, A. (2025). *Prospects for using non-traditional raw materials in the production of edible glazes*. *German International Journal of Modern Science*, *96*, 41–44. https://doi.org/10.5281/zenodo.14699328.

3. Meza, B. E., Peralta, J. M., & Zorrilla, S. E. (2016). *Rheological characterization of full-fat and low-fat glaze materials for foods*. *Journal of Food Engineering*, *171*, 57–66. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.10.012

4. Meza, B. E., Peralta, J. M., & Zorrilla, S. E. (2016). *Rheological characterization of full-fat and low-fat glaze materials for foods*. *Journal of Food Engineering*, *171*, 57–66. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.10.012

5. Meza, B. E., Carboni, A. D., & Peralta, J. M. (2018). *Water adsorption and rheological properties of full-fat and low-fat cocoa-based confectionery coatings*. *Food and Bioproducts Processing*, *110*, 16–25. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.04.005.

6. Meza, B. E., Peralta, J. M., & Zorrilla, S. E. (2021). *Effect of temperature and composition on rheological behaviour and sagging capacity of glaze materials for foods*. *Food Hydrocolloids*, *117*, 106689. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106689

7. Meza, B. E., & Peralta, J. M. (2024). *Rheological, thermal, and moisture sorption characterisation of cocoa-flavoured confectionery coatings elaborated with isomalt as sucrose substitute*. *Food Biophysics*, *19*, 219–229. https://doi.org/10.1007/s11483-023-09819-1

8. Ferreira, S. S., Silva, A. M., & Nunes, F. M. (2018). *Citrus reticulata Blanco peels as a source of antioxidant and anti-proliferative phenolic compounds*. *Industrial Crops and Products*, *111*, 141–148. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.10.009.

9. Zou, Z., Xi, W., Hu, Y., Nie, C., & Zhou, Z. (2016). *Antioxidant activity of Citrus fruits*. *Food Chemistry*, *196*, 885–896. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.09.072.

10. Li, Y., Guo, C., Yang, J., Wei, J., Xu, J., & Cheng, S. (2006). *Evaluation of antioxidant properties of pomegranate peel extract in comparison with pomegranate pulp extract*. *Food Chemistry*, *96*(2), 254–260. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.02.033

11. Wang, S., Nie, S., & Zhu, F. (2016). *Chemical constituents and health effects of sweet potato*. *Food Research International*, *89*(Part 1), 90–116. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.08.032

12. Delgado-Vargas, F., & Paredes-Lopez, O. (2002). *Natural colorants for food and nutraceutical uses* (1st ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781420031713

13. Brudzyńska, P., Sionkowska, A., & Grisel, M. (2021). *Plant-derived colorants for food, cosmetic and textile industries: A review*. *Materials*, *14*(13), 3484. https://doi.org/10.3390/ma14133484

14. Sowbhagya, H. B., Sampathu, S. R., & Krishnamurthy, N. (2004). *Natural colorant from marigold: Chemistry and technology*. *Food Reviews International*, *20*(1), 33–50. https://doi.org/10.1081/FRI-120028829

15. Dufossé, L., Galaup, P., Yaron, A., Arad, S. M., Blanc, P., Chidambara Murthy, K. N., & Ravishankar, G. A. (2005). *Microorganisms and microalgae as sources of pigments for food use: A scientific oddity or an industrial reality? Trends in Food Science & Technology*, *16*(9), 389–406. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.02.006

16. Jespersen, L., Strømdahl, L. D., Olsen, K., et al. (2005). *Heat and light stability of three natural blue colorants for use in confectionery and beverages*. *European Food Research and Technology*, *220*, 261–266. https://doi.org/10.1007/s00217-004-1062-7

17. Faustino, M., Veiga, M., Sousa, P., Costa, E. M., Silva, S., & Pintado, M. (2019). *Agro-food byproducts as a new source of natural food additives*. *Molecules*, *24*(6), 1056. https://doi.org/10.3390/molecules24061056

18. Мєнафова, Ю. В. (уклад.). (2020). *Сучасні напрями розвитку технологій виробництва харчових продуктів» та «Сучасні фізико-хімічні методи у виробництві харчових продуктів: методичні вказівки до лабораторних робіт для студентів спеціальності 102 «Хімія» денної форми навчання*. Донецька державна машинобудівна академія.

19. State Standard of Ukraine. (2017). *DSTU 4660:2017 Napivfabrykaty. Hlazuri ta masy dlia formuvannia. Zahalni tekhnichni umovy*. Derzhstandart Ukrainy.

References

1. Razumova, H., & Oscoma, O. (2021). Confectionery market of Ukraine: analysis and prospects of development. *Primedia ELaunch LLC*, 83–91. https://doi.org/10.36074/tmafmseoid.ed-2.07.

2. Filinska, T., Aleksandrova, O., & Filinska, A. (2025). *Prospects for using non-traditional raw materials in the production of edible glazes*. *German International Journal of Modern Science*, *96*, 41–44. https://doi.org/10.5281/zenodo.14699328.

3. Meza, B. E., Peralta, J. M., & Zorrilla, S. E. (2016). *Rheological characterization of full-fat and low-fat glaze materials for foods*. *Journal of Food Engineering*, *171*, 57–66. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.10.012

4. Meza, B. E., Peralta, J. M., & Zorrilla, S. E. (2016). *Rheological characterization of full-fat and low-fat glaze materials for foods*. *Journal of Food Engineering*, *171*, 57–66. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.10.012

5. Meza, B. E., Carboni, A. D., & Peralta, J. M. (2018). *Water adsorption and rheological properties of full-fat and low-fat cocoa-based confectionery coatings*. *Food and Bioproducts Processing*, *110*, 16–25. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.04.005.

6. Meza, B. E., Peralta, J. M., & Zorrilla, S. E. (2021). *Effect of temperature and composition on rheological behaviour and sagging capacity of glaze materials for foods*. *Food Hydrocolloids*, *117*, 106689. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106689

7. Meza, B. E., & Peralta, J. M. (2024). *Rheological, thermal, and moisture sorption characterisation of cocoa-flavoured confectionery coatings elaborated with isomalt as sucrose substitute*. *Food Biophysics*, *19*, 219–229. https://doi.org/10.1007/s11483-023-09819-1

8. Ferreira, S. S., Silva, A. M., & Nunes, F. M. (2018). *Citrus reticulata Blanco peels as a source of antioxidant and anti-proliferative phenolic compounds*. *Industrial Crops and Products*, *111*, 141–148. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.10.009.

9. Zou, Z., Xi, W., Hu, Y., Nie, C., & Zhou, Z. (2016). *Antioxidant activity of Citrus fruits*. *Food Chemistry*, *196*, 885–896. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.09.072.

10. Li, Y., Guo, C., Yang, J., Wei, J., Xu, J., & Cheng, S. (2006). *Evaluation of antioxidant properties of pomegranate peel extract in comparison with pomegranate pulp extract*. *Food Chemistry*, *96*(2), 254–260. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.02.033

11. Wang, S., Nie, S., & Zhu, F. (2016). *Chemical constituents and health effects of sweet potato*. *Food Research International*, *89*(Part 1), 90–116. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.08.032

12. Delgado-Vargas, F., & Paredes-Lopez, O. (2002). *Natural colorants for food and nutraceutical uses* (1st ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781420031713

13. Brudzyńska, P., Sionkowska, A., & Grisel, M. (2021). *Plant-derived colorants for food, cosmetic and textile industries: A review*. *Materials*, *14*(13), 3484. https://doi.org/10.3390/ma14133484

14. Sowbhagya, H. B., Sampathu, S. R., & Krishnamurthy, N. (2004). *Natural colorant from marigold: Chemistry and technology*. *Food Reviews International*, *20*(1), 33–50. https://doi.org/10.1081/FRI-120028829

15. Dufossé, L., Galaup, P., Yaron, A., Arad, S. M., Blanc, P., Chidambara Murthy, K. N., & Ravishankar, G. A. (2005). *Microorganisms and microalgae as sources of pigments for food use: A scientific oddity or an industrial reality? Trends in Food Science & Technology*, *16*(9), 389–406. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.02.006

16. Jespersen, L., Strømdahl, L. D., Olsen, K., et al. (2005). *Heat and light stability of three natural blue colorants for use in confectionery and beverages*. *European Food Research and Technology*, *220*, 261–266. https://doi.org/10.1007/s00217-004-1062-7

17. Faustino, M., Veiga, M., Sousa, P., Costa, E. M., Silva, S., & Pintado, M. (2019). *Agro-food byproducts as a new source of natural food additives*. *Molecules*, *24*(6), 1056. https://doi.org/10.3390/molecules24061056

18. Mienafova, Yu. V. (2020). Suchasni napriamy rozvytku tekhnolohii vyrobnytstva kharchovykh produktiv» ta «Suchasni fizyko-khimichni metody u vyrobnytstvi kharchovykh produktiv: metodychni vkazivky do laboratornykh robit dlia studentiv spetsialnosti 102 «Khimiia» dennoi formy navchannia. [Modern trends in food production technology“ and ”Modern physical and chemical methods in food production: methodological guidelines for laboratory work for students majoring in Chemistry (102) in full-time programs]. Donetsk State Machine-Build-ing Academy.

19. State Standard of Ukraine. (2017). *DSTU 4660:2017 Napivfabrykaty. Hlazuri ta masy dlia formuvannia. Zahalni tekhnichni umovy*. Derzhstandart Ukrainy.

Дата першого надходження статті до видання: 11.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.12.2025

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

UDC 663.94:663.26

Tetiana Filinska[1], Olena Aleksandrova [2], Antonina Filinska[3]

[1]PhD in Technical Sciences,
Associate Professor of the Department of Technologies of Natural and Synthetic Polymers, Fats and Food Products
Ukrainian State University of Science and Technology (Dnipro, Ukraine)
E-mail: f1l1nskaya@ukr.net. **ORSID:** https://orcid.org/0009-0009-7921-1989

[2]master student of the Department of Technologies of Natural and Synthetic Polymers, Fats and Food Products Ukrainian State University of Science and Technology (Dnipro, Ukraine)
E-mail: lenaaleksandrova007@ukr.net

[3]senior lecturer of the Department of Technologies of Natural and Synthetic Polymers, Fats and Food Products
Ukrainian State University of Science and Technology (Dnipro, Ukraine)
E-mail: antoniyafilin@ukr.net. **ORSID:** https://orcid.org/0009-0001-6975-6186

PROMISING ADDITIVES OF PLANT ORIGIN FOR CONFECTIONERY GLAZE

Food glazes are widely used in the production of confectionery and other food products. They are available in a wide range and with diverse formulations. Traditional components of glazes are increasingly complemented with innovative plant-based ingredients, which enrich them with valuable nutrients, serve as effective substitutes for synthetic E-additives, and improve their technological properties. A significant share of Ukrainian confectionery products is supplied to foreign markets, including the European market, which requires manufacturers to expand their assortment and ensure compliance of product quality with EU and other international standards.

One of the key trends in the global food market is the shift towards natural ingredients. Analysis of recent publications shows that considerable attention is currently paid to the use of plant-based functional additives in the production of glazed confectionery products. Expanding the assortment of confectionery glazes using both non-traditional raw materials and secondary products of the food industry, including industrial by-products, remains relevan.

The properties of powders derived from the peels of various citrus fruits and pomegranate, as well as banana and sweet potato flours, were investigated as additives for confectionery glazes. Studies of their moisture-retention capacity demonstrated high values for powders obtained from the peels of different citrus fruits: pomelo (985%), red grapefruit (808%), mandarin (701%), orange (591%), and sweetie (575%). Small amounts (2–5%) of these additives in glaze formulations may serve as alternatives to synthetic food additives. For banana flour, pomegranate peel powder, and orange and purple sweet potato flours, these values are somewhat lower (199–402%); therefore, their recommended dosage is higher (6–8%). Incorporation of these additives in the indicated quantities ensures the production of glazes with high organoleptic properties that meet the required indicators of moisture content and melting point.

Keywords: *additives; citrus powders; sweet potato; banana flour; glazes.*

Fig.: 3. References: 19.

Філінська Т. Г., Александрова О. С., Філінська А. О. Перспективні добавки рослинного походження для кондитерської глазурі. *Технічні науки та технології,* 2026. № 1(43). С. 300-308. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-300-308.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-309-314
УДК 664

Вікторія Миколаївна Челябієва

кандидат технічних наук, доцент кафедри харчових технологій та екології
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: vika.chl@ukr.net. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0001-5364-4633
ResearcherID: AAA-3194-2020 **Scopus Author ID:** 6505851894

БОРОШНЯНІ КОМПОЗИЦІЙНІ СУМІШІ В ТЕХНОЛОГІЇ ХЛІБА

Вивчений спосіб приготування хліба на пару із композиційної суміші пшеничного, житнього та кукурудзяного борошна. Проаналізовані органолептичні, фізико-хімічні показники, проведена оцінка харчової та енергетичної цінності отриманого за даним способом виробу. Харчова цінність 100 г отриманого продукту складає: жири – 1,1 г, білки - 4,9 г, вуглеводи – 46,8 г, харчові волокна – 3,5 г. Енергетична цінність 100 г продукту становить 220 ккал.

Комбіновані борошняні суміші та альтернативні методи випікання можуть бути успішно використані для виробництва хліба в кризових умовах. Хліб можна готувати на парі із суміші житнього, кукурудзяного та пшеничного борошна в рівних пропорціях.

Ключові слова: *хліб; борошно; спосіб приготування; харчова цінність.*

Рис.: 2. Табл.: 1. Бібл.: 10.

Актуальність теми дослідження. Сучасні типи харчування значною мірою є результатом окультурювання рослин і приручення тварин у процесі історичного розвитку. Еколого-кліматичні умови проживання населення визначали, які культури та тварини складали харчовий раціон у регіоні. Відбирались продуктивні для даної місцевості сільськогосподарські культури і тварини. У 60-х роках ХХ ст. Г. Д. Керіелл в основу класифікації харчування поклав споживання домінуючих продовольчих культур. Він виділив три критерії, які визначають характер харчування: основна зернова культура, основне джерело енергії та основне джерело білків. Саме домінуюча зернова культура регіону буде визначати, який хліб споживає переважно населення у цій місцевості.

Пшениця – найпоширеніша культура для випікання хліба [1]. До пшеничного борошна у процесі приготування хліба можуть додавати добавки. Найбільш часто використовуваними добавками є овочі (наприклад, картопля, цибуля та шпинат), фрукти та горіхи (родзинки, волоські горіхи, арахіс), насіння (мак, кмин, кунжут, льон, чіа) [2]. Доцільним є використання добавок борошна бобових культур: гороху, квасолі, сочевиці, люпину – у технології пшеничного хліба. Підмішування борошна бобових культур до пшеничного борошна вищого і першого ґатунку дозволяє отримати хліб із високими споживчими властивостями й поліпшеною харчовою цінністю [3]. Основні способи приготування хліба з пшеничного борошна – класичний дріжджовий або з використанням закваски [4; 5]. Також відомий швидкий спосіб приготування пшеничного хліба, у якому використовується сода або інший розпушувач, а не дріжджі чи закваска.

Хлібу з житнього борошна віддають перевагу в Північній і Східній Європі. Наприклад, у Фінляндії житнього хліба споживають більше, ніж хліба з пшеничного борошна [1]. В Україні споживають хліб з житнього борошна або суміші його з пшеничним борошном [6]. Дослідження груп населення, яке споживає велику кількість жита в їжу, показали переваги для здоров'я, такі як зниження ризику раку кишківника та покращення роботи кишківника [1].

Кукурудзяний хліб зазвичай виробляють традиційними способами в багатьох регіонах світу, де вирощують кукурудзу. Спеціальний хліб виготовляють із кукурудзяного борошна в Італії, Франції, Німеччині, Англії, а також у Латинській Америці, Португалії та Нігерії [7]. Кукурудзяний хліб є одним із важливих традиційних продуктів Чорноморського регіону Туреччини. Кукурудзяний хліб значно відрізняється від пшеничного хліба своїми характерними сенсорними та текстурними властивостями. Кукурудза є важливим джерелом вуглеводів, жирів а, отже, енергії, яка легко засвоюється. Як і кукурудза, кукурудзяний хліб має харчову цінність. Загальновідомо, що хворим на целіакію дуже важко

© В. М. Челябієва, 2026

знайти поживний хлібобулочний виріб. Кукурудза є однією з найбільш використовуваних сировинних матеріалів для безглютенових продуктів. Кукурудзяний хліб легко можуть споживати хворі на целіакію [7].

Постановка проблеми. Потреба у зерні пшениці в умовах глобальних кліматичних криз та через воєнні конфлікти на території держав, які є основними експортерами пшениці на світовий ринок, не задовольняється у світі загалом. Виробництво зерна пшениці покриває лише близько 55 % загальних потреб. Одним зі способів подолання нестачі пшениці для забезпечення населення є розробка композиційних сумішей на основі пшеничного борошна, які можуть бути використані для приготування хліба.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Харчова цінність хлібобулочних виробів має суттєве значення, адже ці вироби забезпечують понад 50 % добової потреби людини в енергії і близько 75 % потреби у рослинному білку. З метою покращення харчування різних верств населення в умовах глобальних кліматичних змін та впливу воєнних конфліктів на харчову безпеку постійно ведеться пошук і розробка нових технологій харчових продуктів та поліпшення нутрієнтного складу традиційних хлібобулочних виробів.

Як альтернатива пшеничному борошну досліджувалось використання у технології хлібобулочних виробів борошна спельти, яка містить більше білку у порівнянні з пшеницею та багата харчовими волокнами, високоякісними жирами і жиророзчинними вітамінами [8]; гречаного борошна, що характеризується високою харчовою цінністю, легко засвоюється, має гарні смакові якості. Однак на відміну від пшеничного борошна використання спельтового борошна, як самостійної сировини для приготування хлібобулочних виробів, не рекомендується. Готові вироби зі спельтового борошна мають менший об’ємний вихід та характеризуються зниженими іншими фізико-хімічними показниками. Доцільним є використання спельтового борошна у композиційній суміші з пшеничним борошном. Таке поєднання збагачує вироби білком, вітамінами, мінеральними речовинами та іншими біологічно активними речовинами, сповільнює черствіння [8]. Те ж саме стосується і інших видів борошна: гречаного, амарантового, рисового, соргового, кунжутового, полб’яного. Доцільно застосування цих видів борошна у хлібобулочному виробництві не як основної сировини, а у складі композиційних сумішей із пшеничним борошном. Таке поєднання зменшить частку пшеничного борошна у готовому виробі і при цьому дозволить отримати хлібобулочні вироби з оздоровчими властивостями [9].

Кукурудза – поширена культура на різних континентах, вона не вимоглива до кліматичних умов. Кукурудзяне борошно не вартує дорого порівняно з гречаним, рисовим, амарантовим, спельтовим і заслуговує на увагу як компонент композиційної суміші з пшеничним борошном. Порівняно з борошном пшениці у складі кукурудзяного борошна міститься більше клітковини, поліненасичених жирних кислот, есенціальних сполук, таких як сполуки селену, феруму, фолієва кислота, β-каротин, токофероли, глутамінова кислота. Внесення кукурудзяного борошна в рецептуру хліба з пшеничного борошна першого ґатунку покращує якість тіста та готових виробів [9].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. У технології хлібобулочних виробів переважно використовується пшеничне борошно другого, першого, вищого ґатунків або цільнозернове, до якого з метою покращення нутрієнтного складу можуть додавати добавки борошна інших зернових культур (гречки, рису, спельти, амаранту, полби тощо), борошна бобових культур (сочевиці, нуту), добавки овочів (наприклад, пюре гарбуза), шроти або насіння льону, кунжуту, маку та ін. Поширена технологія житньо-пшеничного хліба із суміші двох видів борошна житнього та пшеничного. Вивчалося застосування композиційних сумішей пшеничного і ячмінного борошна та пшеничного і

вівсяного борошна у технології хліба [10]. Однак у науковій літературі обмежена інформація про технологію хлібобулочних виробів із застосуванням композиційної суміші трьох видів борошна злакових культур.

Мета роботи. Вивчений спосіб приготування хліба на пару з суміші пшеничного, житнього та кукурудзяного борошна, зроблена оцінка органолептичних та фізико-хімічних показників готових виробів.

Виклад основного матеріалу. Відомий спосіб приготування хліба з композиційної суміші трьох видів борошна: кукурудзяного, житнього і цільнозернового пшеничного – технологія бостонського темного хліба (Boston Brown Bread). Історія бостонського хліба походить з колоніальної епохи Америки. Спосіб приготування цього хліба зумовлений необхідністю переселенцям з Англії до Америки використовувати місцеві інгредієнти та прості й доступні прийоми приготування хліба. В умовах глобальних кліматичних змін та військових конфліктів досвід приготування хліба з доступних інгредієнтів простим способом має бути вивченим, як приклад адаптивності до мінливих часів.

Рецептура бостонського темного хліба включає рівні об'ємні частини трьох видів борошна: кукурудзяного, житнього та цільнозернового пшеничного, сколотини, сіль, патоку, соду. Поєднання у суміші кукурудзяного та цільнозернового пшеничного борошна зумовлює підвищення харчової цінності хліба, а житнє борошно додає виразний смак і доповнює харчову цінність інших інгредієнтів. Бостонський хліб – без дріжджів, харчова сода допомагає хлібу піднятися під час приготування. Патока забезпечує солодкість, і є природним консервантом, сіль покращує загальний смак і врівноважує солодкість. Сколотини додають хлібу вологи та гострого смаку. Бостонський хліб традиційно споживали з чаєм, тому додавали (необов'язково) родзинки.

Для приготування Boston Brown Bread використали борошно пшеничне цільнозернове (ДСТУ 46.004 – 99), борошно житнє (ТУ У 10.6-31659118-004:2019), борошно кукурудзяне (ТУ У 82.9-31641954-003:2013), патоку крохмальну (ДСТУ 4498:2005). Сколотини замінили знежиреним молоком (жирність 0,9 %). Рецептурний склад тіста наступний: 78 г борошна житнього; 106 г борошна кукурудзяного; 85 г борошна пшеничного цільнозернового; 3,5 г харчової соди; 4 г кухонної солі; 200 г знежиреного молока; 170 г крохмальної патоки.

Технологія приготування: змішували борошно кукурудзяне, пшеничне, житнє, сіль, соду, родзинки. Окремо змішували підігріте знежирене молоко з патокою до однорідної маси. З'єднували обидві суміші сухих та вологих інгредієнтів та перемішували до однорідності. Тісто вміщували у форму для приготування.

Спосіб приготування: форму з тістом накривали алюмінієвою фольгою, змащеною вершковим маслом. Фольгу щільно прикріпляли до країв форми (щоб хліб трохи розпарився), а зверху фольгу трохи роздували по центру, щоб тісто могло підійматися під час випікання, не торкаючись фольги. Хліб готували на пару. Це альтернативний і практичний спосіб приготування при відсутності умов для випікання, як це часто буває у воєнний час. Для приготування хліба на пару вміщували підставку з отворами на дно глибокої металевої ємності. Ємність наповнювали водою, так щоб тільки простір під підставкою був заповнений, ставили на вогонь і давали воді закипіти. На підставку ставили форму з тістом. Ємність закривають кришкою так, щоб між формою з тістом і кришкою залишалось трохи вільного місця. Хліб готували на пару дві години, при цьому слідкували, щоб вода у ємності не википала. Готовий хліб знімали з пару, охолоджували приблизно 10 хвилин, а потім виймали з форми. Нарізували хліб після остаточного охолодження (рис. 1).

Бостонський коричневий хліб традиційно готується у жерстяних банках. Цей хліб має другу назву «Хліб у банці», тому що він реалізується у жерстяних банках, закритих кришкою. Сьогодні для приготування цього хліба можна використовувати пароварку.

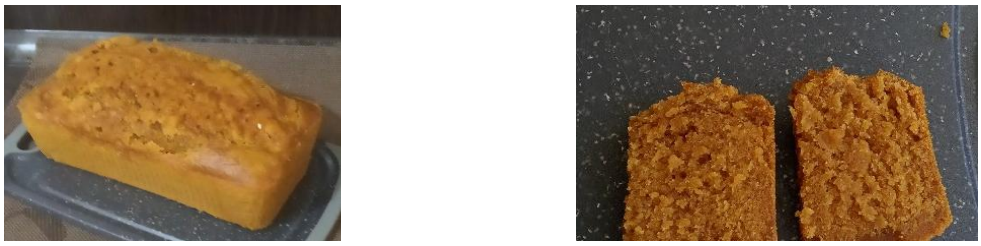


Рис. 1. Хліб із суміші житнього, кукурудзяного та пшеничного борошна, приготований на пару

Джерело: розроблено автором.

За органолептичними показниками готовий виріб відповідав формі, в якій проводили випікання, без бокових випливів. Поверхня відповідає виду виробу, без забруднення, з невеликими тріщинами та підривами. Колір виробу світло-коричневий без підгорілості. М'якушка пропечена, без слідів непромісу з незначною липкістю. Смак і запах властивий даному виду виробів, без стороннього присмаку та запаху. Фізико-хімічні показники виробленого хліба наведені у табл. 1, харчова цінність – на рис. 2. Енергетична цінність 100 г виробу становить ~920 кДж або ~ 220 ккал.

Таблиця 1 – Фізико-хімічні показники готового виробу

Найменування показника	**Значення показника**
Вологість м'якушки, %	43,7
Кислотність м'якушки, град	9,2
Пористість м'якушки, %	47,0

Джерело: розроблено автором

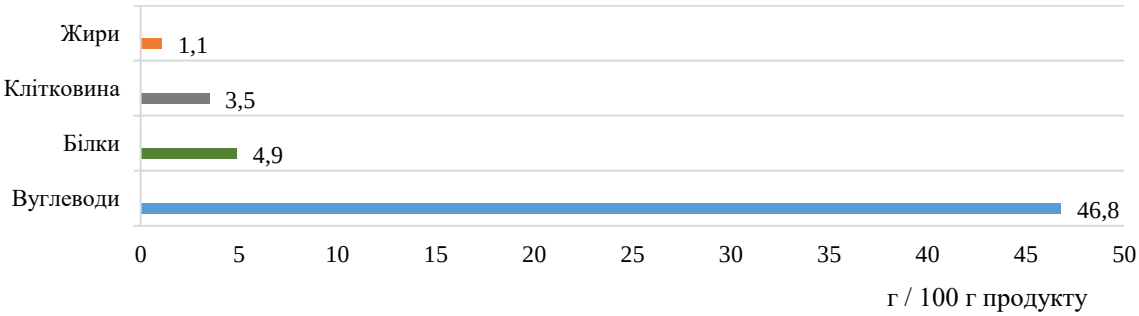


Рис. 2. Харчова цінність 100 г хліба із суміші житнього, кукурудзяного та пшеничного борошна

Джерело: розроблено автором.

Фізико-хімічні показники хліба із суміші житнього і пшеничного борошна згідно ДСТУ-П 4583:2006 мають бути наступними: вологість м'якушки не більше ніж 41,0-53,0 %, кислотність м'якушки не більше ніж 5,0-12,0 град, пористість м'якушки не менше ніж 46 %, при цьому у виробах, м'якушка яких містить фрукти сушені, горіхи, ядра насіння, зернові та круп'яні добавки, пористість не нормують. Фізико-хімічні показники хліба, приготованого на розпушувачі із композиційної суміші трьох видів борошна, порівнювати з фізико-хімічними показниками визначеними ДСТУ-П 4583:2006 можна лише умовно. Проте отримані значення фізико-хімічних показників досліджуваного виробу є прийнятними в Україні для такого виду продукції.

Висновки. В умовах глобальних кліматичних змін та воєнних конфліктів існує загроза продовольчій безпеці. Для виробництва хліба, як продукту харчування першої необхідності у кризових умовах можуть успішно бути використані композиційні суміші борошна та альтернативні випіканню способи приготування хліба – приготування на пару. Хліб

із суміші житнього, кукурудзяного та пшеничного борошна має гарні органолептичні та фізико-хімічні показники. Харчова цінність 100 г хліба: жири – 1,1 г, білки – 4,9 г, вуглеводи – 46,8 г, харчові волокна – 3,5 г. Енергетична цінність – 220 ккал на 100 г.

Список використаних джерел

1. Pohjanheimo, T., Paasovaara, R., Luomala, H., & Sandell, M. (2010). Food choice motives and bread liking of consumers embracing hedonistic and traditional values. *Appetite*, *54*(1), 170–180. https://doi.org/10.1016/j.appet.2009.10.004.

2. Karizaki, V. M. (2017). Ethnic and traditional Iranian breads: Different types, and historical and cultural aspects. *Journal of Ethnic Foods*, *4*(1), 8–14. https://doi.org/10.1016/j.jef.2017.01.002.

3. Cheliabiieva, V., & Sosedova, E. (2018). Використання заквасок спонтанного бродіння та борошна бобових культур у виробництві хліба. *Technical Sciences and Technolog Ies*, (3(13)), 251–257. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-3(13)-251-257.

4. Pontonio, E., Nionelli, L., Curiel, J. A., Sadeghi, A., Di Cagno, R., Gobbetti, M., & Rizzello, C. G. (2015). Iranian wheat flours from rural and industrial mills: Exploitation of the chemical and technology features, and selection of autochthonous sourdough starters for making breads. *Food Microbiology*, *47*, 99–110. https://doi.org/10.1016/j.fm.2014.10.011.

5. Berezkina, N. A., Buialska, N. P., & Cheliabiieva, V. N. (2024). Technology of spontaneous fermentation sourdough from high-grade wheat flour and its characteristics. *Herald of Lviv University of Trade and Economics. Technical Sciences*, (38), 14–19. https://doi.org/10.32782/2522-1221-2024-38-02.

6. Глушко, М. (2012). Походження та джерела вчиненого хліба в українців (культурно-генетичний аспект). *Народознавчі зошити*, (1), 3–18.

7. Yılmaz, V. A., & Koca, İ. (2020). Development of gluten-free corn bread enriched with anchovy flour using TOPSIS multi-criteria decision method. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, *22*, 100281. https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2020.100281.

8. Писарець, О. П. (2019). Застосування борошна зі спельти в технології пшеничного хліба. *Продовольчі ресурси*, (12), 136–141. https://doi.org/10.31073/foodresources2019-12-15.

9. Овсієнко, С. М., & Науменко, О. В. (2023). Використання нехлібопекарських видів борошна у хлібопеченні. *Продовольчі ресурси*, *11*(20), 99–110. https://doi.org/10.31073/foodresources2023-20-10.

10.Rieder, A., Holtekjølen, A. K., Sahlstrøm, S., & Moldestad, A. (2012). Effect of barley and oat flour types and sourdoughs on dough rheology and bread quality of composite wheat bread. *Journal of Cereal Science*, *55*(1), 44–52. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2011.10.003.

References

1. Pohjanheimo, T., Paasovaara, R., Luomala, H., & Sandell, M. (2010). Food choice motives and bread liking of consumers embracing hedonistic and traditional values. *Appetite*, *54*(1), 170–180. https://doi.org/10.1016/j.appet.2009.10.004.

2. Karizaki, V. M. (2017). Ethnic and traditional Iranian breads: Different types, and historical and cultural aspects. *Journal of Ethnic Foods*, *4*(1), 8–14. https://doi.org/10.1016/j.jef.2017.01.002.

3. Cheliabiieva, V., & Sosedova, E. (2018). Використання заквасок спонтанного бродіння та борошна бобових культур у виробництві хліба. *Technical Sciences and Technolog Ies*, (3(13)), 251–257. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-3(13)-251-257.

4. Pontonio, E., Nionelli, L., Curiel, J. A., Sadeghi, A., Di Cagno, R., Gobbetti, M., & Rizzello, C. G. (2015). Iranian wheat flours from rural and industrial mills: Exploitation of the chemical and technology features, and selection of autochthonous sourdough starters for making breads. *Food Microbiology*, *47*, 99–110. https://doi.org/10.1016/j.fm.2014.10.011.

5. Berezkina, N. A., Buialska, N. P., & Cheliabiieva, V. N. (2024). Technology of spontaneous fermentation sourdough from high-grade wheat flour and its characteristics. *Herald of Lviv University of Trade and Economics. Technical Sciences*, (38), 14–19. https://doi.org/10.32782/2522-1221-2024-38-02.

6. Hlushchko M. (2012). Pokhodzhennia ta dzherela vchynenoho khliba v ukraintsiv (kulturno-henetychnyi aspect) [Origin and sources of baked bread among Ukrainians (cultural and genetic aspect)]. *Narodoznavchi zoshyty – Ethnological notebooks,* 1, 3-18.

7. Yılmaz, V. A., & Koca, İ. (2020). Development of gluten-free corn bread enriched with anchovy flour using TOPSIS multi-criteria decision method. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, *22*, 100281. https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2020.100281.

8. Pysarets O. P. (2019) Zastosuvannia boroshna zi spelty v tekhnolohii pshenychnoho khliba [Cured beard and spelled in wheat bread technology]. *Prodovolchiresursy – Food resources, 12,* 136-141. https://doi.org/10.31073/foodresources2019-12-15

9. Ovsiienko S. M. & Naumenko O. V. (2023). Vykorystannia nekhlibopekarskykh vydiv boroshna u khlibopechenni [Use of non-bakery types of flour in bread baking]. *Prodovolchi resursy – Food resources, 11*(20), 99–110. https://doi.org/10.31073/foodresources2023-20-10

10.Rieder, A., Holtekjølen, A. K., Sahlstrøm, S., & Moldestad, A. (2012). Effect of barley and oat flour types and sourdoughs on dough rheology and bread quality of composite wheat bread. *Journal of Cereal Science*, *55*(1), 44–52. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2011.10.003.

Дата першого надходження статті до видання: 18.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 08.01.2026

UDC 664

Viktoriia Cheliabiieva

PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Food Technology and Ecology
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: vika.chl@ukr.net. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0001-5364-4633
ResearcherID: AAA-3194-2020. **Scopus Author ID:** 6505851894

FLOUR COMPOUNDS IN BREAD TECHNOLOGY

To overcome the food crisis in the context of global climate change and military conflicts, new food technologies and improvements in their nutritional composition beaned sought and developed.

Wheat grain production covers only about 55% of the total demand. Composite mixtures based on wheat flour for making bread are one of the ways to overcome the shortage of wheat to provide for the population.

The purpose of the article is to highlight the results of studying the method of making bread from a mixture of wheat, rye and corn flour, evaluating the organoleptic and physicochemical indicators of finished products.

Whole-wheat flour, rye and corn flour, molasses, skim milk, baking soda and salt used to make the bread. The loose ingredients mixed flour of wheat, flour of corn, flour of rye, salt, soda, raisins. Separately heated skim milk mixed with molasses until smooth. Both the dry and wet ingredient mixtures combined and mixed until smooth. The dough placed in a pan. The bread was steamed. The organoleptic and physicochemical parameters of the finished product were evaluated using standard methods.

The surface of resulting product corresponds to the type of product, has small cracks. The color of the product is light brown. The crumb baked. The taste and smell are typical for this type of product, without foreign taste and smell. The moisture content of the crumb was 43.7%, the acidity of the crumb was 9.2 degrees, and the porosity was 47%. Nutritional value of 100 g of bread: fats – 1.1 g, proteins - 4.9 g, carbohydrates – 46.8 g, dietary fiber – 3.5 g. The energy value of 100 g of the product is about 220 kcal.

Composite flour mixtures and alternative baking methods can to take successfully used to produce bread in crisis conditions. Bread can be prepared with steam from a mixture of rye, corn and wheat flour in equal proportions.

Keywords: *bread; flour; cooking method; nutritional value.*

Fig.: 2. Table: 1. References: 10.

РОЗДІЛ IV. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-315-322
УДК 621.36

Дмитро Геннадійович Алексієвський[1], Віктор Олександрович Баранов[2], Костянтин Олегович Туришев[3], Сергій Леонідович Шмалій[4]

[1]доктор технічних наук, професор кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення
Запорізький національний університет (Запоріжжя, Україна)
E-mail: lasian2017@ukr.net. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-5787-6092

[2]студент кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення
Запорізький національний університет (Запоріжжя, Україна)
E-mail: victorbaranov339@gmail.com. **ORCID:** http://orcid.org/0009-0009-8406-6747. **ResearcherID:** PQW-9523-2026

[3]старший викладач кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення
Запорізький національний університет (Запоріжжя, Україна)
E-mail: k_turyshev@ukr.net. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0003-2938-9710

[4]доцент кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення
Запорізький національний університет (Запоріжжя, Україна)
E-mail: es.feeit@gmail.com. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0001-6399-0310. **ResearcherID:** PHN-1947-202

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА НА БАЗІ ЕФЕКТУ ПЕЛЬТЬЄ

У роботі здійснено синтез мультифізичної візуально-блочної моделі елемента Пельтьє, яка описує термодинамічні, термоелектричні та електричні процеси. Модель синтезована за допомогою методу візуально-блочного моделювання. Результати моделювання та їх порівняльний аналіз з експериментом дозволяє зробити висновок про високий ступінь адекватності отриманої моделі. Універсальний характер даної моделі дозволяє застосувати її в подальшому для дослідження та проєктування термоелектричних джерел електричної енергії. Важливою властивістю отриманої моделі є досить адекватний опис її динамічних характеристик як елемента електричної схеми, що дозволяє вирішувати питання щодо проєктування джерел електроживлення елементів Пельтьє та систем автоматичного керування на їхній основі.

Ключові слова: *ефект Пельтьє; математична модель; термоелектричні процеси; візуально-блочне моделювання.*
Рис. 5. Бібл.: 8.

Актуальність теми дослідження. Елементи Пельтьє, або термоелектричні перетворювачі, знаходять дедалі ширше застосування в різних галузях промисловості – від систем охолодження до автономних рішень для генерації енергії. За останні десятиріччя була проведена значна кількість досліджень, спрямованих на підвищення ефективності та точності моделювання елементів Пельтьє. Наявність математичних моделей даних пристроїв дозволяє значно полегшити процедури розробки та оптимізацію параметрів і характеристик пристроїв на їхній основі. Ця робота була присвячена розробці математичної моделі елемента Пельтьє, що дозволяє говорити про актуальність теми.

Постановка проблеми. Математичне моделювання складних технічних об’єктів є ключовим та важливим елементом наукової та інженерної практики. Однак, в деяких випадках, виникає проблема взаємодії результатів теоретичних досліджень з реальною інженерною практикою. У інженерів-практиків часто виникає проблема доступності технологічних та зручних методів аналізу та розрахунку складних технічних об’єктів. Додатковим фактором, що обумовлює складність інженерного використання математичного моделювання є мультидисциплінарність об’єкта моделювання. Прикладом такого об’єкта можна вважати елемент Пельтьє. Одним із засобів подолання цих проблем є застосування візуально-блочного моделювання (ВБМ), як методології синтезу математичних моделей складних технічних систем, що базується на спеціальній нотації та процедури синтезу. Приклад синтезу моделі було розглянуто в [1]. Високий рівень формалізації, що застосовується, забезпечує значне скорочення трудоємності процедури синтезу, зменшує вимоги до квалі-

© Д. Г. Алексієвський, В. О. Баранов, К. О. Туришев, С. Л. Шмалій, 2026

фікації інженерного працівника, як розробника математичних моделей. В основі ВБМ лежить декомпозиція системи, при якій вона представляється у вигляді структури енергетичного тракту, що складається з замкненого набору елементів. Застосування даного підходу потребує наявності відповідної бібліотеки елементів ВБМ. У цьому контексті актуалізується потреба в розробці компонента бібліотеки візуально-блочного моделювання, яка б відображала складну взаємодію фізичних процесів в елементі Пельтьє, зокрема й перехідні процеси, що є важливим при проєктуванні складних технічних систем де елемент Пельтьє виступає елементом.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Синтезу математичних моделей термоелектричного модуля Пельтьє (ТЕМП), до теперішнього часу, було присвячено багато наукових досліджень. У більшості випадків в основу побудови моделі було покладено електричну аналогію. У роботі [2] синтезована статична модель ТЕМП, за допомогою якої було проведено дослідження впливу характеристик матеріалів на ефективність термоелектричного перетворення. У роботі [3] була запропонована методологія визначення параметрів математичної моделі з параметрів та характеристик, що надають виробники ТЕМП. Особливістю запропонованої моделі була її придатність до отримання передавальних функцій вузла для використання, в подальшому, у процедурі синтезу автоматичних систем керування температурою. У роботі [4] була продовжена тема розробки математичної моделі [3], але вже з урахуванням структури з розподіленими параметрами. Робота [5] була присвячена створенню алгоритму розрахунку статичних характеристик ТЕМП з використанням даних виробників. У роботі [6] було синтезовано тривимірну математичну модель ТЕМП, у якій було враховано зв'язок між електричними процесами у напівпровідниках та термодинамічними процесами у вузлі. Модель враховує ефект Томсона, ефект Пельтьє, теплопровідність Фур'є та джоулеве нагрівання. Робота [7] була присвячена синтезу моделі ТЕМП та перевірці її адекватності шляхом проведення порівняльного аналізу результатів модельного та фізичного експерименту. У роботі [8] була зроблена оцінка точності відтворення характеристик запропонованою математичною моделлю ТЕМП для гарячої та холодної сторони модуля. Слід зазначити, що у роботах [3], [4], [6], [7], [8] розглядалися саме динамічні моделі ТЕМП.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Поширені підходи до синтезу моделі, які базуються на електричній аналогії, загалом придатні для організації обчислювального потоку, але опосередковано відображають причино-наслідкові зв’язки які існують в реальному фізичному об’єкті такому як ТЕМП. Тобто, вони достатньо адекватно вирішують завдання розрахунку параметрів та характеристик, але не дуже добре сприяють розумінню. Це є дуже важливим не тільки з погляду розуміння процесу дослідником, але і для освітнього процесу. Розв’язання цієї проблеми можливе шляхом створення казуальної візуально-блочної моделі ТЕМП, яка візуалізує реально існуючі причино-наслідкові зв’язки у фізичному об’єкті. Крім того, такий принцип побудови математичної моделі природно вписується у методику синтезу візуально-блочного моделювання [1]. Який дозволяє будувати мультифізичні моделі системи. Це значно розширює діапазон використання даної каузальної моделі.

Мета статті. Створення мультифізичної візуально-блочної моделі елемента Пельтьє, яка описує термодинамічні, термоелектричні та електричні процеси з урахуванням його динамічних властивостей. Потенційними сферами застосування моделі є проектування систем автоматичного керування, розробка ефективних джерел живлення для елементів Пельтьє.

Виклад основного матеріалу. Математична модель в нотації візуально-блочного моделювання (ВБМ) [1] має вигляд (рис. 1).

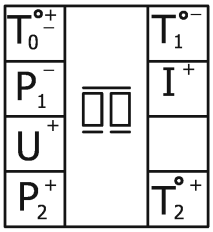


Рис. 1. Загальний вигляд елементу бібліотеки ВБМ для ТЕМП (представлення елементу у вигляді «чорного ящика»)

Зліва розташовані параметри що є входами з погляду причинно-наслідкових зв'язків (причини), праворуч – параметри які є виходами (наслідки). Зображений елемент має входи: T_0^{+-} – температура навколишнього середовища; P_1^- та P_2^+ – потужність, що відбирається від гарячої та приймається холодною стороною, відповідно; U^+ – вхідна напруга. Виходи: T_1^- та T_2^+ – температура на гарячій та холодній стороні, відповідно; I^+ – вхідний струм.

Індекси «+» та «-» вказують на напрям потоку потужності в системі. Відповідно «+» вказує на те, що параметр характеризує вхідний потік потужності, «-» – вихідний потік. Слід зазначити, що параметр, який позначає температуру зовнішнього середовища «T_0^+» як вхідний потік, для холодної сторони елементу Пельтьє, так і вихідний потік для гарячої сторони. Тому він позначається подвійним індексом «+ -»

Внутрішня структура моделі ВБМ зображена на рис. 2.

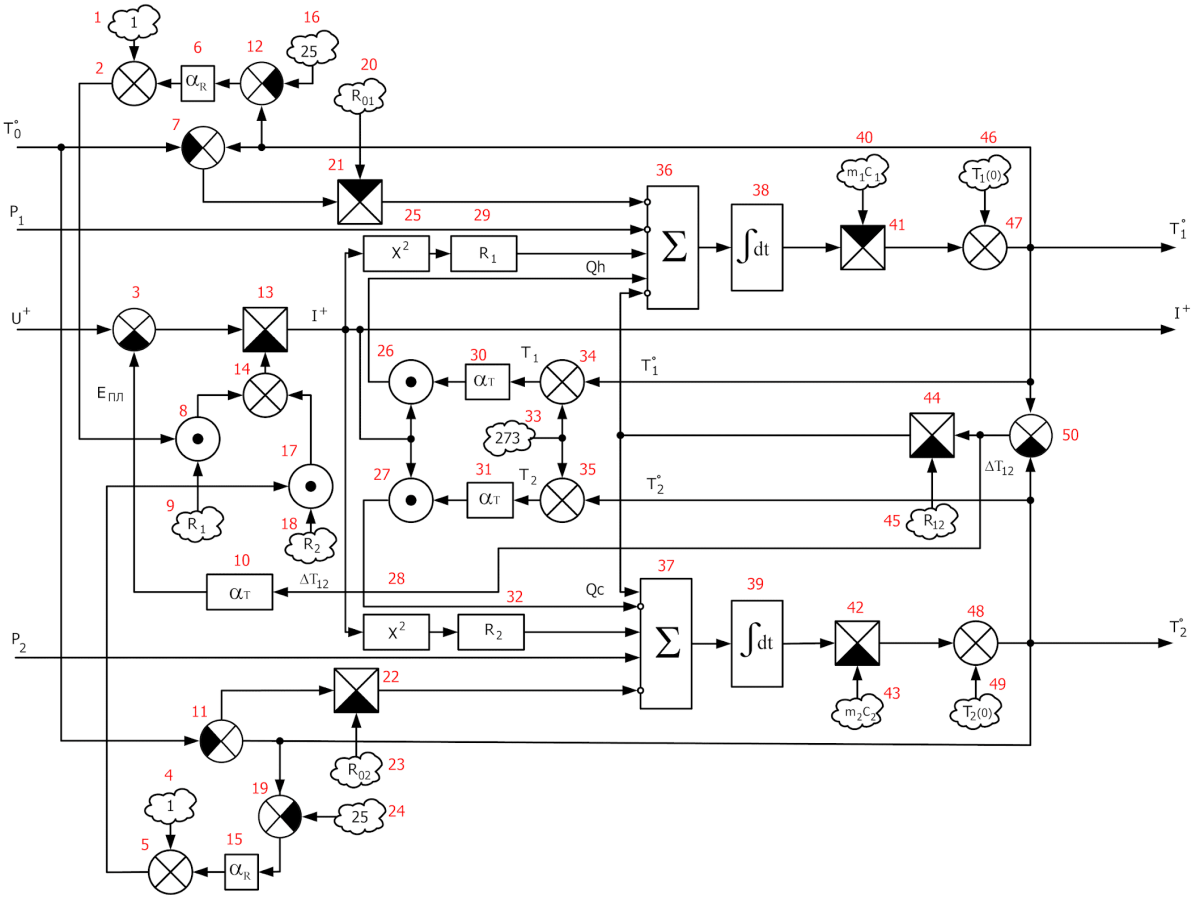


Рис. 2. Модель елемента Пельтьє

Температури сторін визначаються інтегральними рівняннями (1) та (2), для гарячої та холодної сторони, відповідно. Вони враховують питому теплоємність сторін, їх масу, та початкову температуру.

$$T_1^-(t) = \frac{1}{m_1 c_1}\int_0^t \Delta P_1(t)dt + T_1^-(0), \quad (1)$$

$$T_2^+(t) = \frac{1}{m_2 c_2}\int_0^t \Delta P_2(t)dt + T_2^+(0), \quad (2)$$

Ці рівняння реалізовані за допомогою блоків: 36, 38, 40, 41, 46, 47 для гарячої сторони, а для холодної сторони за допомогою блоків: 37, 39, 42, 43, 48, 49.

Електрична підсистема моделі реалізує закон Ома, закон Джоуля-Ленца, ефект Зеєбека. Вхідна напруга $U^{+'}$, з урахуванням термоЕРС, за ефектом Зеєбека, визначається за допомогою рівняння (3).

$$U^{+'} = U^+ - \Delta T \cdot \alpha, \quad (3)$$

де U^+ – вхідна напруга, В; ΔT – різниця температур між сторонами, К; α – коефіцієнт Зеєбека, В/К.

Рівняння (3) реалізується блоками 3, 10, 50. Струм крізь ТЕМП розраховується за допомогою рівняння (4).

$$I^+ = \frac{U^{+'}}{R_1' + R_2'}, \quad (4)$$

де I^+ – вхідний струм, А; В; R_1', R_2' – електричний опір гарячої та холодної сторони, відповідно, з урахуванням впливу температури на опір, Ом.

Рівняння (4) реалізується блоками 14, 13.Опори R_1', R_2' розраховуються у рівняннях (12), (13). Потужність, що розсіюється на сторонах ТЕМП, відповідно до закону Джоуля-Ленца, описується рівнянням (5) для гарячої сторони, та (6) для холодної сторони.

$$P_1 = I^2 \cdot R_1', \quad (5)$$

$$P_2 = I^2 \cdot R_2', \quad (6)$$

Рівняння (5) реалізується блоками 25, 29. Рівняння (6) реалізується блоками 28, 32.

Термічний опір середовище-сторона R_{01} визначає потік теплової енергії до навколишнього середовища через термічний опір середовище-гаряча сторона у виразі (7), та потік потужності крізь термічний опір середовище-холодна сторона R_{02} у виразі (8).

$$P_1 = \frac{T_1^- - T_0^\pm}{R_{01}}, \quad (7)$$

$$P_2 = \frac{T_2^+ - T_0^\pm}{R_{02}}. \quad (8)$$

Рівняння (7) реалізовано блоками 7, 20, 21. Рівняння (8) реалізовано блоками 11, 22, 23.

Термічний опір між гарячою та холодною сторонами визначає витік потужності між сторонами крізь термічний опір R_{12} за рівнянням (9),

$$P = \frac{T_1^- - T_2^+}{R_{12}}. \quad (9)$$

Рівняння (9) реалізується блоками 44, 45, 50. Отримана потужність додається до холодної сторони та віднімається від гарячої.

Потужність виділення чи поглинання тепла за ефектом Пельтьє розраховується за рівняннями (10), (11).

$$P_1 = \alpha \cdot T_1^- \cdot I, \quad (10)$$

$$P_2 = \alpha \cdot T_2^+ \cdot I, \quad (11)$$

Рівняння (10), (11) розглядають абсолютну температуру у градусах Кельвіна (К). Рівняння (10) реалізується блоками 26, 30, 33, 34. Рівняння (11) реалізується блоками 27, 31, 33, 35.

Температурний коефіцієнт опору для гарячої та холодної сторони реалізується за рівняннями (12), (13).

$$R^{1'} = R^{1}_{(0)} \cdot \left(1 + \alpha_R\left(T_1^{-} - T^{-}_{1(0)}\right)\right), \quad (12)$$

де $R^{1'}$ – опір за температури T_1^{-}, Ом; $R^{1}_{(0)}$ – опір за температури $T^{-}_{1(0)}$, Ом; α_R – температурний коефіцієнт опору, 1/K; T_1^{-} – поточна температура гарячої сторони, K; $T^{-}_{1(0)}$ – температура гарячої сторони при якій виміряний опір $R^{1}_{(0)}$, K.

$$R^{2'} = R^{2}_{(0)} \cdot \left(1 + \alpha_R\left(T_2^{-} - T^{-}_{2(0)}\right)\right), \quad (13)$$

Рівняння (12) реалізується блоками 1, 2, 6, 8, 9, 12, 16. Рівняння (13) реалізується блоками 4, 5, 15, 17, 18, 19, 24.

Адекватність отриманої математичної моделі було перевірено шляхом порівняння динамічних характеристик, що були отримані в результаті моделювання та фізичного експерименту.

Вони були розраховані за допомогою даних отриманих з експерименту.

Проведення модельного експерименту було здійснено за допомогою ВБМ. Структура ВБМ наведена на рис. 3.

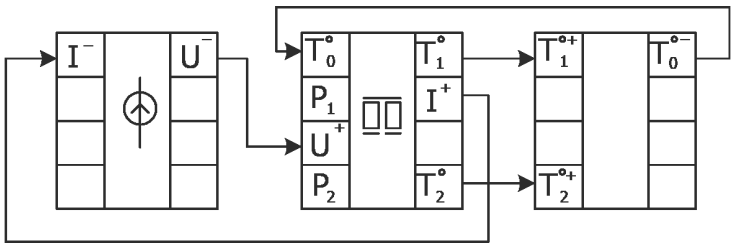


Рис. 3. Структура візуально-блочної моделі

На рис. 4 показані динамічні характеристики в режимі запуску системи. Під час моделювання був виявлений значний вплив температурного коефіцієнта опору (ТКО) на роботу ТЕМП. Включення опису цього впливу до моделі дозволив збільшити її адекватність.

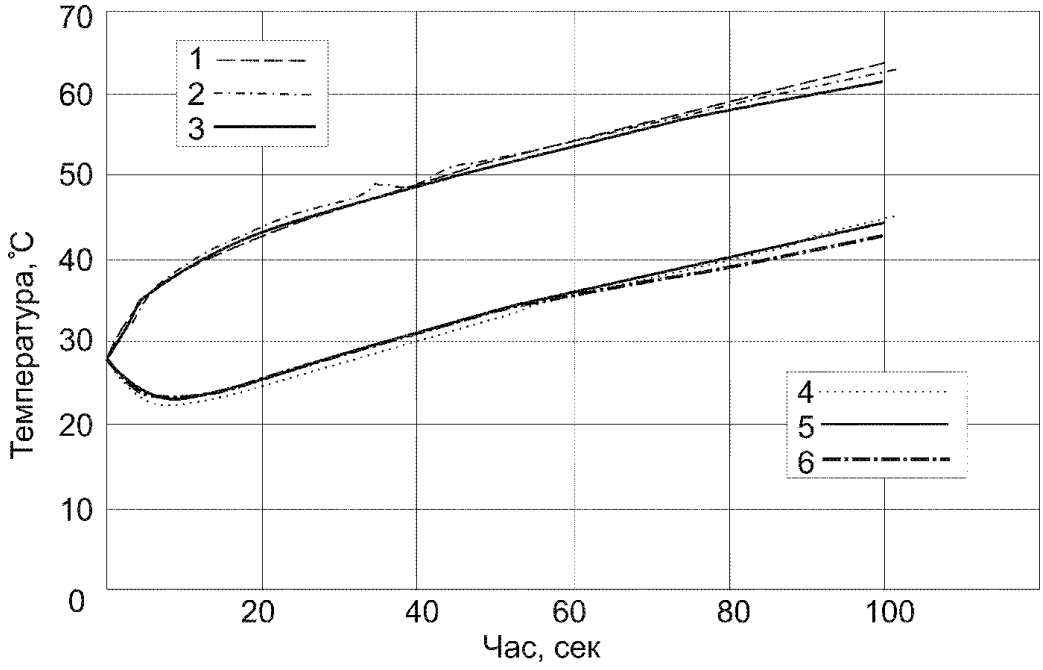


Рис. 4. Порівняльний аналіз температури сторін ТЕМП в режимі пуску при модельному та фізичному експерименті

Цифрою 1 – температура гарячої сторони моделювання, 2 – позначена температура гарячої сторони експерименту, 3 – температура гарячої сторони моделювання без урахування температурного коефіцієнта опору (ТКО), 4 – температура холодної сторони експерименту, 5 – температура холодної сторони моделювання, 6 – температура холодної сторони моделювання без урахування ТКО.

Вплив ТКО добре видно на перехідному процесі напруги на ТЕМП, що зображено на рис. 5. Цифрою 1 позначено результат експерименту, 2 – моделювання, 3 – моделювання без урахування ТКО.

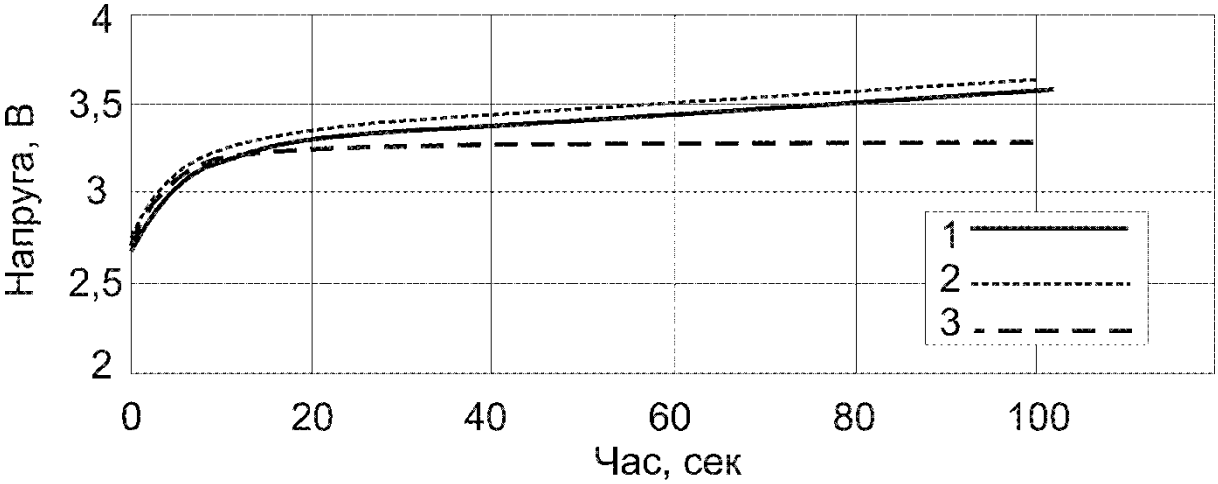


Рис. 5. Порівняльний аналіз напруги на ТЕМП в режимі пуску при модельному та фізичному експерименті

Результати моделювання добре збігаються з експериментом, з похибкою менше ніж 3%, що свідчить про високий ступінь адекватності моделі.

Для проведення модельного експерименту було потрібно отримати вхідні дані констант моделі. У [3; 4; 7] запропонована методика розрахунку використовуючи дані з технічної документації. Була розроблена методика розрахунку основних параметрів з даних фізичного експерименту. Коефіцієнт Зеєбека для випадку живлення від джерела струму розраховується відповідно рівняння (14)

$$\alpha = \frac{\Delta V}{\Delta T}. \tag{14}$$

Для здійснення розрахунку обирається така ділянка перехідного процесу, при якій присутня значна різниця температур між сторонами, але середня температура сторін не значно змінюється, щоб приріст напруги від ТКО не додав похибки. Для перехідного процесу, який зображено на рис. 4 та 5 цим вимогам відповідає період часу 0 - 10 с.

Для розрахунку температурного коефіцієнта опору використовується період часу коли різниця температур між сторонами постійна, а середня температура сторін змінюється. Для рис. 4, 5 це період 40 - 100 с. ТКО був розрахований за рівнянням (15)

$$\alpha_R = \frac{\frac{V_2}{I} - \frac{V_1}{I}}{\frac{V_1}{I}(T_2 - T_1)}. \tag{15}$$

У розглянутому варіанті ТЕМП ТКО склав 0,386 %/K.

Висновки і пропозиції. У роботі було розроблено мультифізичну візуально-блочну модель елемента Пельтьє, яка комплексно описує термодинамічні, термоелектричні та електричні процеси з урахуванням його динамічних властивостей. Запропонований підхід дозволяє адекватно відтворювати перехідні та усталені режими роботи термоелектричного модуля.

Перевірка адекватності моделі шляхом порівняння результатів моделювання з експериментальними даними показала високу адекватність. Максимальна відносна похибка становила 5 %. Висока точність роботи моделі підтверджує коректність фізичних уявлень покладених в її основу.

Також було запропоновано методику визначення ключових параметрів елемента Пельтьє для параметризації моделі.

Отримані результати можуть бути використані при проєктуванні систем автоматичного керування, розробці ефективних джерел живлення, а також у практичних системах охолодження і термостатування на базі елементів Пельтьє.

Список використаних джерел

1. Alekseevskiy, D., Pankova, O., & Khrestin, R. (2018). Procedure for the synthesis of models of electro-technical complexes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(9–96).

2. Mitrani, D., Salazar, J., Turo, A., García, M. J., & Chávez, J. A. (2008). Lumped and distributed parameter SPICE models of TE devices considering temperature-dependent material properties. *International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems*. https://doi.org/10.48550/arxiv.0801.1037.

3. Lineykin, S., & Ben-Yaakov, S. (2005). Analysis of thermoelectric coolers by a SPICE-compatible equivalent-circuit model. *IEEE Power Electronics Letters*, 3(2), 63–66. https://doi.org/10.1109/lpel.2005.846822.

4. Lineykin, S., & Ben-Yaakov, S. (2007). Modeling and analysis of thermoelectric modules. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 43(2), 505–512. https://doi.org/10.1109/tia.2006.889813.

5. Belovski, I., Staneva, L., Aleksandrov, A., & Rahnev, P. (2017). Mathematical model of thermoelectric Peltier module. *Journal of Communication and Computer*, 14(2). https://doi.org/10.17265/1548-7709/2017.02.002.

6. Meng, J.-H., Wang, X.-D., & Zhang, X.-X. (2013). Transient modeling and dynamic characteristics of thermoelectric cooler. *Applied Energy*, 108, 340–348. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.03.051.

7. Alaoui, C. (2011). Peltier thermoelectric modules modeling and evaluation. *International Journal of Engineering*, 5, 114–121. https://www.researchgate.net/publication/228865590.

8. Chavez, J. A., Ortega, J. A., Salazar, J., Turo, A., & Garcia, M. J. (б. д.). SPICE model of thermoelectric elements including thermal effects. У *17th IEEE instrumentation and measurement technology conference*. IEEE. https://doi.org/10.1109/imtc.2000.848895.

References

1. Alekseevskiy, D., Pankova, O., & Khrestin, R. (2018). Procedure for the synthesis of models of electro-technical complexes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(9–96).

2. Mitrani, D., Salazar, J., Turo, A., García, M. J., & Chávez, J. A. (2008). Lumped and distributed parameter SPICE models of TE devices considering temperature-dependent material properties. *International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems*. https://doi.org/10.48550/arxiv.0801.1037.

3. Lineykin, S., & Ben-Yaakov, S. (2005). Analysis of thermoelectric coolers by a SPICE-compatible equivalent-circuit model. *IEEE Power Electronics Letters*, 3(2), 63–66. https://doi.org/10.1109/lpel.2005.846822.

4. Lineykin, S., & Ben-Yaakov, S. (2007). Modeling and analysis of thermoelectric modules. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 43(2), 505–512. https://doi.org/10.1109/tia.2006.889813.

5. Belovski, I., Staneva, L., Aleksandrov, A., & Rahnev, P. (2017). Mathematical model of thermoelectric Peltier module. *Journal of Communication and Computer*, 14(2). https://doi.org/10.17265/1548-7709/2017.02.002.

6. Meng, J.-H., Wang, X.-D., & Zhang, X.-X. (2013). Transient modeling and dynamic characteristics of thermoelectric cooler. *Applied Energy*, 108, 340–348. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.03.051.

7. Alaoui, C. (2011). Peltier thermoelectric modules modeling and evaluation. *International Journal of Engineering*, 5, 114–121. https://www.researchgate.net/publication/228865590.

8. Chavez, J. A., Ortega, J. A., Salazar, J., Turo, A., & Garcia, M. J. (б. д.). SPICE model of thermoelectric elements including thermal effects. У *17th IEEE instrumentation and measurement technology conference*. IEEE. https://doi.org/10.1109/imtc.2000.848895.

Дата першого надходження статті до видання: 15.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.12.2025

UDC 621.36

Dmytro Hennadiiovych Aleksiievskyi[1], Viktor Oleksandrovych Baranov[2], Kostiantyn Olehhovych Turyshev[3], Serhii Leonidovych Shmalii[4]

[1]Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electronics, Information Systems and Software
Zaporizhzhia National University (Zaporizhzhia, Ukraine)
E-mail: lasian2017@ukr.net. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-5787-6092

[2]Student of the Department of Electronics, Information Systems and Software
Zaporizhzhia National University (Zaporizhzhia, Ukraine)
E-mail: victorbaranov339@gmail.com. **ORCID:** http://orcid.org/0009-0009-8406-6747. **ResearcherID:** PQW-9523-2026

[3]Senior Lecturer of the Department of Electronics, Information Systems and Software
Zaporizhzhia National University (Zaporizhzhia, Ukraine)
E-mail: k_turyshev@ukr.net. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0003-2938-9710

[4]Associate Professor of the Department of Electronics, Information Systems and Software
Zaporizhzhia National University (Zaporizhzhia, Ukraine)
E-mail: es.feeit@gmail.com. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0001-6399-0310. **ResearcherID:** PHN-1947-202

MATHEMATICAL MODEL OF A THERMOELECTRIC CONVERTER BASED ON THE PELTIER EFFECT

The work presents the synthesis of a detailed multiphysics visual-block model of a Peltier element, which comprehensively describes the thermodynamic, thermoelectric, and electrical processes occurring during its operation. Unlike simplified approaches, the model covers the full spectrum of physical phenomena, including heat losses, the mutual influence of temperature gradients on electrical parameters, and the effects related to thermal conductivity and the internal resistance of the material. The model was developed using a visual-block modeling method, which ensures clarity, ease of further modification, and the possibility of integration into more complex systems.

The simulation made it possible to obtain both dynamic and steady-state characteristics of the Peltier element under various operating conditions, including variable thermal loads, changes in supply polarity, and nonstandard thermal regimes. A comparative analysis of the simulation results with experimental data demonstrates the high degree of adequacy of the proposed model. In particular, the deviation between the experimental and computed values of temperature and electrical parameters in dynamic modes does not exceed acceptable limits, which confirms the correctness of the applied mathematical dependencies and modeling approaches.

The universal nature of the developed model allows it to be used for further research and design of thermoelectric energy sources, including optimization of the device structure, selection of operating modes, and evaluation of energy efficiency. The model can serve as a basis for creating digital twins of thermoelectric systems, opening opportunities for automated optimization of parameters in complex thermal and electrical environments.

An important property of the model is its ability to accurately reproduce the dynamic characteristics of the Peltier element as part of an electrical circuit. This enables solving engineering problems related to the design of high-efficiency power supplies for thermoelectric modules, predicting their dynamic behavior in control systems, and optimizing algorithms for automatic temperature regulation. Thus, the developed model is a reliable tool for engineers and researchers working in the field of thermoelectrics and energy systems.

Keywords: *Peltier effect, mathematical model, thermoelectric processes, visual-block modeling*

Алексієвський Д. Г., Баранов В. О., Туришев К. О., Шмалій С. Л. Математична модель термоелектричного перетворювача на базі ефекту Пельтьє. *Технічні науки та технології*, 2026. № 1(43). С. 315-322. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-315-322.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-323-331
УДК 621.822:621.313

Олександр Миколайович Мінко
кандидат технічних наук, старший дослідник, начальник науково-дослідної частини
Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут» (Харків, Україна)
E-mail: dr.alexandr.minko@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-3206-0131

ПАРАМЕТРИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ГЕОМЕТРІЇ ВАЛЬНИЦІ ВАЖКОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МАШИНИ

Стаття присвячена процесу параметричного проєктування та перехід до мультипараметричного проєктування при визначенні оптимальної геометрії вальниці важкої електричної машини, на прикладі турбогенератора. Побудовано параметричну математичну модель розрахунку елементів вальниці яка враховує багатофізичні процеси її роботи: механічні, електродинамічні, та теплові. Запропоновано геометричне співвідношення довжини вкладки підшипника до його діаметра використовувати як критеріальний параметр для визначення мінімальної втрати електричної енергії в підшипниковій опорі. Встановлено діапазон значень оптимальної геометрії вищезгаданого співвідношення вкладки вальниці, який може бути використано для виконання інженерних розробок.

***Ключові слова*:** *електромеханічний перетворювач енергії; вальниці; параметричне проєктування; багазофізичні процеси; оптимізація.*
Рис.: 5. Табл.: 1. Бібл.: 14.

Актуальність теми дослідження. Електромеханічні перетворювачі енергії (ЕМПЕ) складають основну групу устаткування енергетичної галузі промисловості. Для теплових та атомних електростанцій це обладнання, разом із теплогенеруючої ланкою, є основою продуктивності та безперервністю виробництва електричної енергії. Окремо ці ЕМПЕ використовуються на вітрогенераторних установках, гідроелектростанціях та у складі енергетичних установок, на кшталт газотурбінних та паротурбінних установках різного рівня потужності. У режимі двигуна електричні машини (ЕМ) використовуються майже в усіх галузях промисловості, починаючи від легкої галузі та завершуючи металургійною та нафтопереробною промисловістю. Важкі електричні машини, такі як турбогенератори (ТГ), класифікуються від потужності 200 МВт та вище. Масогабаритні показники таких електричних машин є індивідуальними та серійного виробництва майже не існує (є серії не великої кількості). Так, наприклад ТГ потужністю 300 МВТ має масу 320 т, та довжину ротора 12 000 мм, ТГ потужністю 550 МВт – 365 т, з довжиною 12 765 мм. Такі показники маси та габаритів впливають на особливості проєктування вальниці турбогенераторів. Функціонально вальниці ТГ сприймає різні за природою фізичні навантаження (механічні, електродинамічні, теплові) та є складним та трудомістким вузлом при виконанні розробки та розрахунків. Надійність роботи вальниці важкого ЕМПЕ є одним з основних вимог для безпечного та тривалого режиму роботи ЕМ в цілому. Результатом проєктування вальниці є визначення режимних показників роботи (включаючи й питання систем оливозабезпечення та відводу надлишкового тепла зони вальниці) та геометричних показників діаметра та довжини шийки валу ротора (як елементів що сполучаються з вкладкою підшипника). Виконання пошуку ефективної та оптимальної геометрії вкладки вальниці є актуальною та важливою науково-технічною задачею, яка, по-перше, повинна забезпечити виконання вимог стійкості використання підшипникового вузла, а по-друге, дотримуватись економічної ефективності з погляду зниження витрат електричної енергії в зоні вальниці [1].

Постановка проблеми. Розробка вальниці важкої ЕМ у класичному розумінні заводиться до послідовного виконання розрахунків реакції підшипникової опори на електромеханічні навантаження, розрахунку системи ковзання (розрахунок та моделювання мастильної плівки між вкладкою вальниці та шийки вала ротора), та завершального розрахунку теплового стану та вібраційного стану (аналіз коливань). На кожному етапі розробки змінюються критерії розрахунків та моделювання, тому що змінюються умови

© О. М. Мінко, 2026

проєктування залежно від того які враховуються процеси та явища: механічні, електродинамічні, чи теплові. Для досягнення усередненого показника геометрії активної зони вальниці потрібно запропонувати такий параметр (критерій), що б його було доцільно використовувати в параметричному проєктування для подальшої розробки та моделювання програмними засобами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження побудови та розрахунків вальниці ЕМПЕ розглядалось в різні часи та під конкретним кутом задач, так було вирішено завдання розрахунку елементів ковзання вальниці [2], досліджувались питання геометрії високообертових ЕМ [3], розглядалась можливість покращення показників надійності підшипника та продовження його строку експлуатації [4]. Окремо досліджено стан вальниці при довготривалому використанні та оцінено залишковий ресурс [5]. Робота, наприклад, [6], присвячена оптимізації підходів щодо його проєктування, також є роботи з дослідження системи моніторингу та діагностування елементів вальниці потужних ЕМ [7].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Аналіз та теоретичне дослідження існуючих наукових та науково-виробничих робіт дозволив виокремити питання, які не були достатньо розв’язані та потребують більш поглибленого дослідження. К цим питанням відноситься задача параметричного визначення оптимальної геометрії активної зони (діаметр та довжина вкладки) вальниці за умовою зниження втрат електричної потужності в підшипниковому вузлі. Саме розв’язання цієї задачі в межах параметричного та мультипараметричного проєктування дасть змогу подальшого розвитку програмному забезпеченню та написанню відповідних програмних блоків для автоматизації процесу.

Метою статті є дослідження геометричних показників вальниці потужної ЕМ засобом параметричного проєктування для зниження втрат електричної енергії в зоні сполучення вкладки вальниці з шийкою вала ротора. Для досягнення мети потрібно вирішити такі задачі:

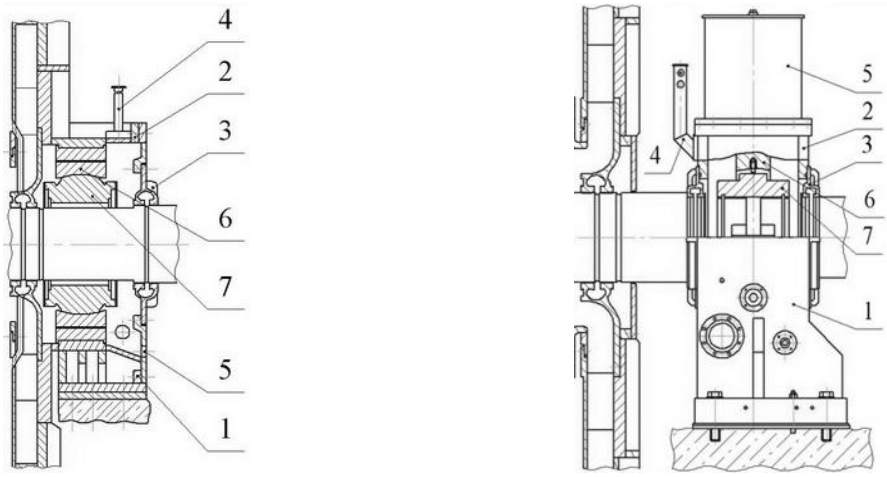
– скласти параметричну математичну модель, яка враховує багатофізичні показники роботи вальниці ТГ;

– запропонувати конструкційний параметр (критерій) вальниці ТГ, який має функціональний взаємозв’язок із показниками механічного, електродинамічного та теплового стану підшипникової опори;

– у межах параметричного проєктування визначити область оптимальних значень запропонованого параметра конструкції вальниці ТГ із забезпеченням мінімальних витрат електричної потужності в зоні підшипникової опори.

Виклад основного матеріалу. У межах комплексного аналізу параметричного проєктування вальниці ТГ виокремлено два типи підшипників, які відрізняються за конструктивними ознаками: щитова вальниці та виносна (окремо стояча). Загальний вид підшипникового вузла в обох конструктивних сполученнях представлено на рис. 1, де позначено: 1 – нижня частина корпусу, 2 – верхня частина (кришка вальниці), 3 – зовнішній оливоуловлювач, 4 – витяжні труби, 5 – отвори подачі/зливу оливи, 6 – обойма вальниці, 7 – вкладка вальниці. Переваги та недоліки цих підшипників більш детально розглянуто в [8]. Вони однаково ефективно використовуються в ТГ вітчизняного виробництва, та в конструкції закордонних виробників.

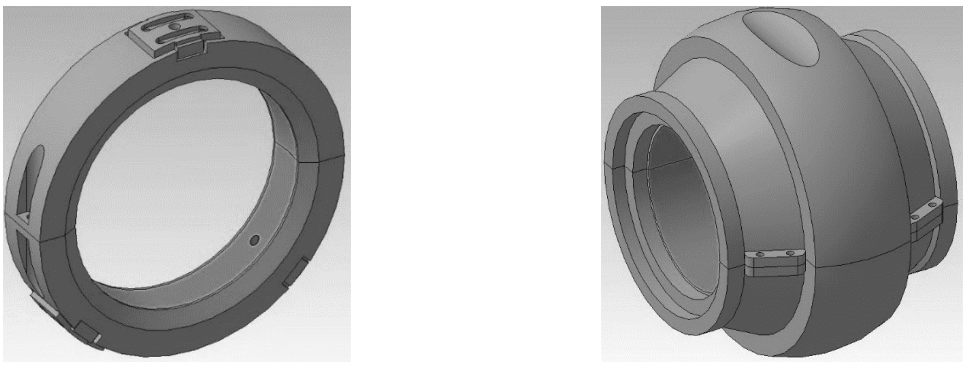
Оскільки з погляду механічних процесів та характеру динамічного та статичного навантаження головними функціональними вузлами обох типів вальниці є шийка валу, діаметр вкладки вальниці та відстань між осями підшипників – тому параметричне представлення обох варіантів зведемо до визначення ширини та діаметра вкладки вальниці. Тривимірна модель обойми та вкладки вальниці зображено на рис. 2.



а *б*

Рис. 1. Склад вальниці важкого турбогенератора:
а – щитовой вид; б – виносний вид

Джерело: розроблено автором.



а *б*

Рис. 2 Обойма (а) та вкладка вальниці ТГ (б)

Джерело: розроблено автором.

Отримання мультипараметричної математичної моделі вальниці ЕМ, для подальшого моделювання, супроводжується певними методологічними умовами, які ми зазначимо наступним чином [9]:

– з метою практичного використання математичної моделі будемо уникати складних диференціальних та інтегральних виразів;

– для пояснення сутності математичної моделі виконаємо її складання в матричному представленні.

Матрицю параметричного масиву даних вальниці ЕМ визначимо в розмірі 2×3, яка містить елементи a_{11} … a_{32}, тоді ряд залежних від a величин позначимо як сукупність змінних b_1 … b_m. Кількість строк в матриці відповідають кількості фізичних процесів, що відбуваються в зоні вальниці: механічні, електродинамічні, теплові. Присвоїмо ім’я матриці – Pidsch(a), та визначимо п’ять (за кількістю стовпців та строк матриці) мультипараметричних залежностей, і на рис. 3 отримаємо загальний вид математичної моделі вальниці ЕМ в параметричному представленні.

Метою побудови мультипараметричної математичної моделі є отримання функціональних залежностей вальниці ЕМ, серед яких пропонується до встановлення такі багатофізичні показники [10]:

1. Механічні:

d_b – діаметр вкладки вальниці, що сполучається з ротором, мм;

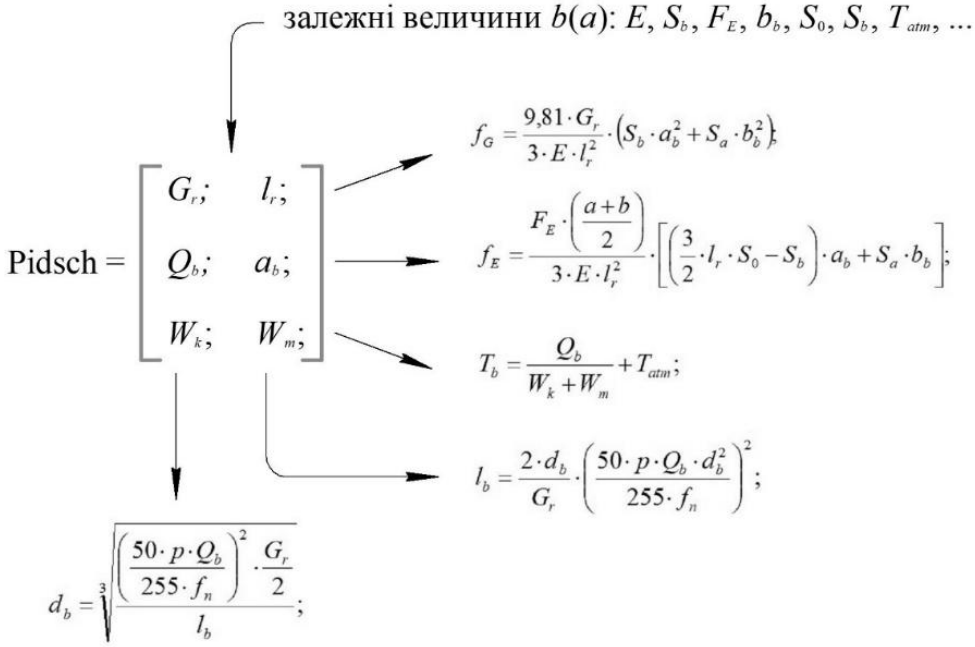


Рис. 3. Мультипараметрична математична модель вальниці ТГ
Джерело: розроблено автором.

l_b – ширина вкладки вальниці, що сполучається з ротором, мм;

f_G – показники прогину валу ротора ЕМ під впливом механічних сил в області підшипника, мм;

2. Тепло-вентиляційні:

T_b – показник температурного стану підшипникового вузла ЕМ, °С;

3. Електродинамічні:

f_E – показники прогину валу ротора ЕМ під впливом електромагнітних сил, мм;

Показники, які наведено вище вичерпною мірою обґрунтовують економічну, технологічну та функціональну доцільність, на яку слід спиратися при проєктуванні вальниці майже будь-якого типу ЕМПЕ [11].

Склад мультипараметричної матриці визначимо такими показниками:

а) показники задані попереднім етапом проєктування ЕМ: показник маси ротора (G_r) та загальна довжина ротора (l_r);

б) показник, який є результатом попереднього компонування загального виду ЕМ: осьова відстань від центру вала ротора до вальниці (a_b);

в) довідникові показники, які дають характеристику тепловим умовам, у яких працює вальниця ТГ: коефіцієнт ефективності відводу тепла (W_k) та коефіцієнт, який характеризує тепломеханічні показники середи охолодження вальниці (мастила), (W_m). Які мають такі математичні значення:

$$W_k = \frac{\lambda_b \cdot s_b}{L_{cool}}; \quad \text{та} \quad W_k = m_m \cdot C_m; \tag{1}$$

де λ_b – коефіцієнт теплопровідності матеріалу вкладки вальниці, Вт/м·°С; s_b – площа поверхні вкладки вальниці, яка віддає тепло, мм^2; L_{cool} – довжина теплового шляху від вкладки до конструкційної точки відводу тепла за межі підшипникової зони, мм; m_m – масова витрата оливи системою охолодження вальниці, кг/с; C_m – питома тепломісткість оливи, Дж/кг·°С.

З міркувань економічної доцільності цільова функція параметричного проєктування повинна зв'язувати втрати електричної енергії у вальниці (Q_{pidich}) та показники ширини (l_b) та діаметру (d_b) вкладки. Математично модель залежності $Q_{pidich}(l_b;d_b)$ має наступний вигляд, а розрахункова область наведена на рис. 4:

$$Q_{pidsch}(l_b;d_b)=Q_{mech}+Q_{em}+Q_{add}=\left(f_T\cdot\frac{F_b\cdot\upsilon_s}{\mu_s}\right)+\left(k_m\cdot B^2\cdot f_T\cdot d_b\right)+\left(\alpha_m\cdot\omega^n\right); \quad (2)$$

де Q_{mech} – механічні втрати потужності, кВт; Q_{em} – електродинамічні втрати потужності, кВт; Q_{add} – додаткові в супутні втрати потужності, кВт; f_T – коефіцієнт тертя вала ротора та вкладки вальниці, в.о.; F_b – радіальне навантаження на кладку вальниці, Н; υ_s – швидкість ковзання, м/с; μ_s – коефіцієнт корисної дії мастильного шару між поверхнею ротора та вкладкою вальниці, в.о.; k_m – комплексний коефіцієнт, який враховує матеріал робочої прошини вкладу вальниці, конструкцію вала ротора, конструкцію обойми вальниці, систему подачі та відводу мастила, тощо, в.о.; B – магнітна індукція, Тл; α_m – коефіцієнт, який залежить від конструкції та умов експлуатації, в.о., ω^n – кутова швидкість ротора, рад/с.

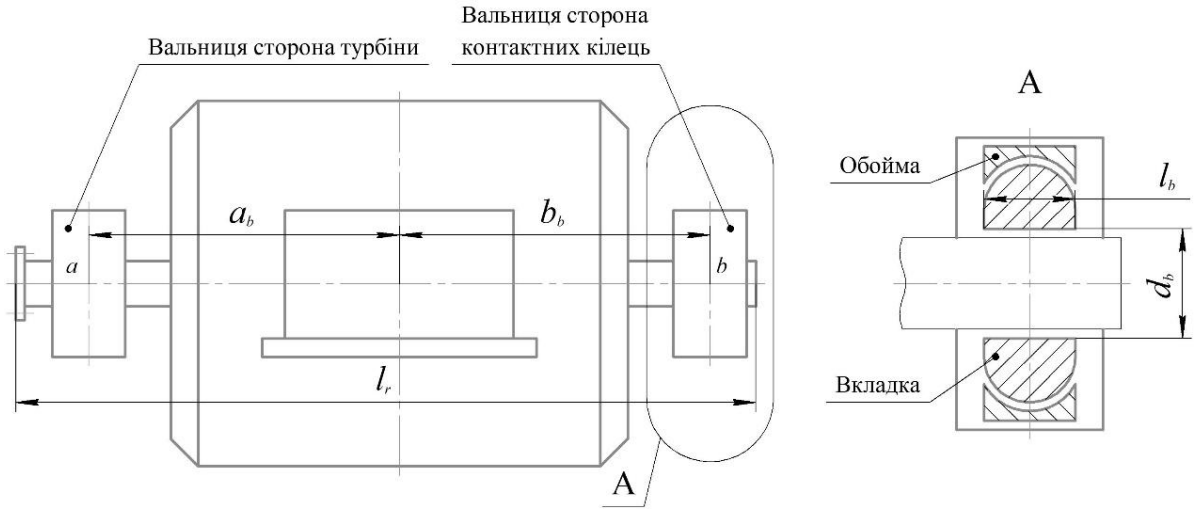


Рис. 4. Розрахункова область вальниці ТГ

Джерело: розроблено автором.

Аналізуючи вираз (2) можна дослідити оптимальне співвідношення та загальну тенденцію залежності ширини та діаметра вкладки вальниці ТГ від рівня втрат електричної енергії на тертя в підшипниковому вузлу. Для цього пропонуємо ввести геометричне співвідношення k_b (параметричний критерій), яке дорівнює:

$$k_b=\frac{l_b}{d_b}. \quad (3)$$

Спростим вираз (2) з урахуванням виразу (3) та матрицею на рис. 3 і отримаємо:

$$Q_{pidsch}(k_b)=255\cdot\sqrt{\frac{G_2}{2}\cdot k_b}\cdot d_b^2\cdot\left(\frac{f_n}{50\cdot p}\right); \quad (4)$$

де f_n – номінальна промислова частота мережі, Гц; p – кількість пар полюсів ЕМ.

Для виконання розрахунків по виразу (4) приймаймо масу ротора 36000 кг, матеріал мастила – мастило турбінне Тп-22 ГОСТ 9972-74 (товщина плівки – 0,2 мм, прийнята як статистична), а за центральну точку співвідношення візьмемо $k_b = 1$, тобто $l_b = 0{,}5$ та $d_b = 0{,}5$ в.о., результати розрахунку наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Розрахунок втрат електричної потужності у вальниці ТГ в залежності від показника k_b

Показник k_b, в.о.	Втрата потужності Q_{pidsch}, кВт	
	при d_b – const	при l_b – const
0,70	226,3	461,8
0,75	234,2	416,4
0,80	242,0	378,0
0,85	249,4	345,1
0,90	256,6	316,8
0,95	263,6	292,1
1,00	**270,5**	**270,5**
1,05	277,2	251,4
1,10	283,7	234,4
1,15	290,0	219,3
1,20	296,3	205,8
1,25	302,4	193,5
1,30	308,4	182,5

За результатами табл. 1 побудовано графік залежності $Q_{pidsch}(k_b)$ на якому нанесли статистичні обмеження які пов'язані з механічною стійкістю (балансом) площини сполучення шийки валу ротора ТГ та робочої поверхні вкладки вальниці, які знаходяться в діапазоні значень k_b = 0,6 … 1,7 [12] (рис. 5). На рис. 6 зображено ймовірну конструкцію виносної підшипникової опори. З наведеної залежності можна зробити такі висновки:

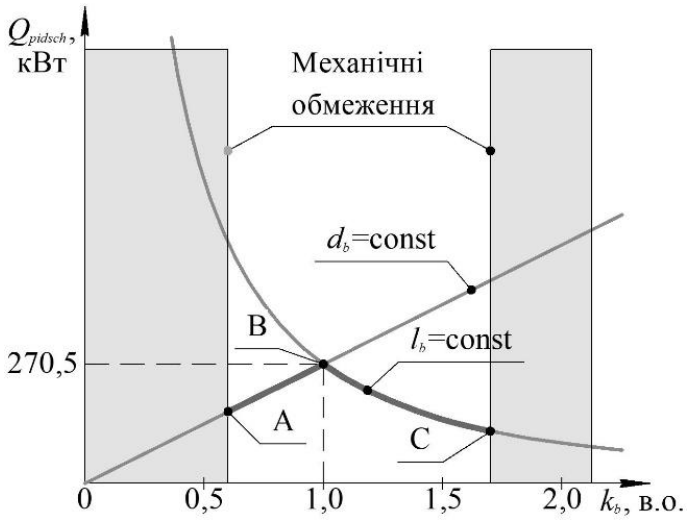


Рис. 5. Залежність $Q_{pidsch}(k_b)$ з зонами механічного обмеження

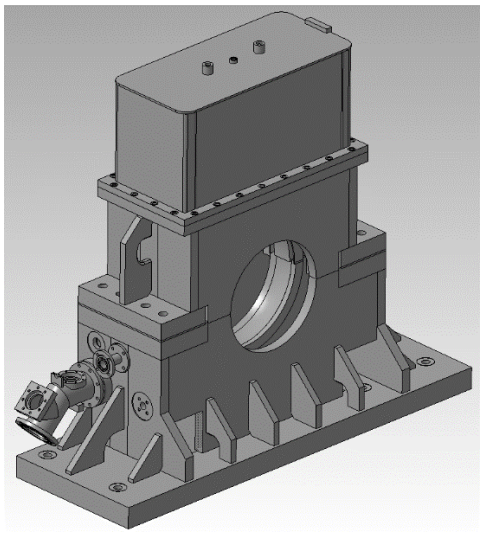


Рис. 6. Загальний вид виносної підшипникової опори

Джерело: розроблено автором.

– співвідношення l_b/d_b не завжди повинні наближатись до мінімального значення, для зниження втрат потужності електричної енергії в зоні вальниці, можна використовувати значення k_b=1 задля досягнення високого рівня механічного балансу у вальниці, при цьому витрати енергії не будуть максимальні (точка B);

– оптимальна геометрія маси та габаритів вкладки вальниці, з погляду зменшення витрат енергії на тертя, знаходиться на ділянці кривій A-B-C, при чому зменшення витрат енергії відбувається з наближенням до точок A та C, а використання k_b за межами цих точок – неприпустимо.

Висновки. Складена параметрична математична модель, яка дозволяє враховувати багатофізичні показники роботи важкої електричної машини при розробці елементів конструкції вальниці, показала доцільність та комплексність використання мультипараметричної методології проєктування.

Запропоноване конструкційне співвідношення довжини шийки вала ротора до його діаметра інформаційно підвищує функціональний взаємозв'язок із показниками механічного, електродинамічного та теплового стану вальниці та може бути використано для розробки вкладки вальниці різних типів електричних машин.

В межах параметричного проєктування визначено область оптимальних значень запропонованого параметра (k_b) конструкції вальниці ТГ яка дозволяє забезпечити мінімальні витрати електричної потужності в зоні підшипникової опори, та є практичною рекомендацією при виконанні інженерних етапів проєктних робіт.

Використовуючи вищезазначені положення було розроблено підшипниковий вузол потужної електричної машини (500 МВт), який відрізняється підвищеною стабільністю за рахунок ізоляції вальниці від механічних коливань статора, патент на корисну модель [13]. Та розроблено підшипниковий щит потужної електричної машини, який відрізняється симетричною системою подачі/відводу мастила у робочу зону вкладки вальниці, патент на корисну модель [14].

Список використаних джерел

1. Zhao, X., Mu, Z., Zhao, H., Wang, P., Song, W., & Yang, G. (2023). Influence of Inner Roller Geometric Parameters on Counter-Roller Spinning with 6061 Aluminum Alloy Tube. *Metals*, 13(10), 1720. https://doi.org/10.3390/met13101720.

2. Maksimenko, O., Nikulin, A., & Pryimak, A. (2023). Engineering methodology for calculation the roll pass dimensions in continuous rolling of bars and sections. *International Science Journal of Engineering & Agriculture,* 2(2), 82–90. https://doi.org/10.46299/j.isjea.20230202.08.

3. Questa, H., Mohammadpour, M., Theodossiades, S., Garner, C. P., Bewsher, S. R., & Offner, G. (2023). Tribodynamic Modelling of High-Speed Rolling Element Bearings in Flexible Multi-Body Environments. *Machines*, 11(1), 93. https://doi.org/10.3390/machines11010093.

4. Darisuren, S., Park, J.-H., Pyun, Y.-S., & Amanov, A. (2019). A Study on the Improvement of the Fatigue Life of Bearings by Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification Technology. *Metals*, 9(10), 1114. https://doi.org/10.3390/met9101114.

5. Poltschak, F., & Thalhammer, R. (2024). Extending the service life of plain bearings for linear permanent magnet machines. In *2024 International Conference on Electrical Machines (ICEM)* (pp. 1–7). https://doi.org/10.1109/ICEM60801.2024.10700293.

6. Kong, H., Gu, C., Zhang, D., & Wu, L. (2025). Topology Optimization of Textured Journal Bearings. *Lubricants*, 13(6), 251. https://doi.org/10.3390/lubricants13060251.

7. Ramirez, I., Muñoz, C., Marquez, F. (2017). A Condition Monitoring System for Blades of Wind Turbine Maintenance Management. *Proceedings of the Tenth International Conference on Management Science and Engineering Management. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 502. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1837-4_1.

8. Wrat, G., Bhola, M., Chamorro, D., Liniger, J. & Pedersen, H. C. (2025). Review of Fault Detection and Diagnosis Methods Including Failure Root Causes of Major Components of Hydraulic Pitch System for Wind Turbines-Part-I. *International Journal of Fluid Power*, 26(04), 471–538. https://doi.org/10.13052/ijfp1439-9776.2641.

9. Pospelov, K. N., Burlutskaya, Z. V., Gintciak, A. M., & Troshchenko, K. D. (2023). Multiparametric optimization of complex system management scenarios based on simulation models. *International Journal of Technology, 14*(8), 1748–1758. https://doi.org/10.14716/ijtech.v14i8.6832

10.Teles, J., Castro, P. & Matos, H. (2013) Multi-parametric disaggregation technique for global optimization of polynomial programming problems. *J Glob Optim* 55, 227–251. https://doi.org/10.1007/s10898-011-9809-8.

11.Rodriguez-Fortun, J.-M., Alvarez, J., Monzon, L., Salillas, R., Noriega, S., Escuin, D., Abadia, D., Barrutia, A., Gaspar, V., Romeo, J. A., Cebrian, F., & Alonso, R. (2024). Digitalization of an Industrial Process for Bearing Production. *Sensors*, 24(23), 7783. https://doi.org/10.3390/s24237783.

12.Breidenstein, B., Denkena, B., Krödel, A., Prasanthan, V., Poll, G., Pape, F., & Coors, T. (2020). Production-Related Surface and Subsurface Properties and Fatigue Life of Hybrid Roller Bearing Components. *Metals*, 10(10), 1339. https://doi.org/10.3390/met10101339.

13.Мінко, О. М., Кобзар, К. О., Пенській, В. Ф., & Гордієнко, В. Ю. (2012). *Підшипниковий вузол потужної електричної машини* (Патент України № 72432). Державна служба інтелектуальної власності України.

14.Мінко О. М., Кобзар К. О., Гордієнко В. Ю. (2013) *Підшипниковий щит потужних електричних машин* (Патент України, № 78119). Державна служба інтелектуальної власності України.

References

1. Zhao, X., Mu, Z., Zhao, H., Wang, P., Song, W., & Yang, G. (2023). Influence of Inner Roller Geometric Parameters on Counter-Roller Spinning with 6061 Aluminum Alloy Tube. *Metals*, no. 13(10), pp. 1720. https://doi.org/10.3390/met13101720

2. Maksimenko, O., Nikulin, A., & Pryimak, A. (2023). Engineering methodology for calculation the roll pass dimensions in continuous rolling of bars and sections. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 2(2), 82–90. https://doi.org/10.46299/j.isjea.20230202.08

3. Questa, H., Mohammadpour, M., Theodossiades, S., Garner, C. P., Bewsher, S. R., & Offner, G. (2023). Tribodynamic Modelling of High-Speed Rolling Element Bearings in Flexible Multi-Body Environments. *Machines*, 11(1), 93. https://doi.org/10.3390/machines11010093

4. Darisuren, S., Park, J.-H., Pyun, Y.-S., & Amanov, A. (2019). A Study on the Improvement of the Fatigue Life of Bearings by Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification Technology. *Metals*, 9(10), 1114. https://doi.org/10.3390/met9101114

5. Poltschak, F. & Thalhammer R. (2024) Extending the Service Life of Plain Bearings for Linear Permanent Magnet Machines, *2024 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Torino, Italy*, 2024, pp. 1 – 7, doi:10.1109/ICEM60801.2024.10700293.

6. Kong, H., Gu, C., Zhang, D., & Wu, L. (2025). Topology Optimization of Textured Journal Bearings. *Lubricants*, 13(6), 251. https://doi.org/10.3390/lubricants13060251

7. Ramirez, I., Muñoz, C., Marquez, F. (2017). A Condition Monitoring System for Blades of Wind Turbine Maintenance Management. *Proceedings of the Tenth International Conference on Management Science and Engineering Management. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 502. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1837-4_1

8. Wrat, G., Bhola, M., Chamorro, D. M., Liniger, J. & Pedersen, H. C. (2025). Review of Fault Detection and Diagnosis Methods Including Failure Root Causes of Major Components of Hydraulic Pitch System for Wind Turbines-Part-I. *International Journal of Fluid Power*, 26(04), 471–538. https://doi.org/10.13052/ijfp1439-9776.2641

9. Pospelov, K.N., Burlutskaya, Z.V., Gintciak, A.M., & Troshchenko, K.D. (2023) Multiparametric Optimization of Complex System Management Scenarios Based on Simulation Models. *International Journal of Technology*. Vol. 14(8), pp. 1748-1758. https://doi.org/10.14716/ijtech.v14i8.6832

10.Teles, J., Castro, P. & Matos, H. (2013) Multi-parametric disaggregation technique for global optimization of polynomial programming problems. *J Glob Optim* 55, 227–251. https://doi.org/10.1007/s10898-011-9809-8

11.Rodriguez-Fortun, J.-M., Alvarez, J., Monzon, L., Salillas, R., Noriega, S., Escuin, D., Abadia, D., Barrutia, A., Gaspar, V., Romeo, J. A., Cebrian, F., & Alonso, R. (2024). Digitalization of an Industrial Process for Bearing Production. Sensors, 24(23), 7783. https://doi.org/10.3390/s24237783

12.Breidenstein, B., Denkena, B., Krödel, A., Prasanthan, V., Poll, G., Pape, F., & Coors, T. (2020). Production-Related Surface and Subsurface Properties and Fatigue Life of Hybrid Roller Bearing Components. Metals, 10(10), 1339. https://doi.org/10.3390/met10101339

13.Minko, O., Kobzar, K., Penskoy, V., & Gordienko, V. (2012). Pidshypnykovyi vuzol potuzhnoi elektrychnoi mashyny [Bearing unit of a powerful electric machine]. (Patent of Ukraine, No. 72432).

14.Minko, O., Kobzar, K., & Gordienko, V. (2013) Pidshypnykovyi shchyt potuzhnykh elektrychnykh mashyn [Bearing shield of powerful electric machines]. (Patent of Ukraine, No. 78119).

Дата першого надходження статті до видання: 15.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.01.2026

UDC 621.822:621.313

Oleksandr Minko

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of Research Department
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute" (Kharkiv, Ukraine)
E-mail: dr.alexandr.minko@gmail.com. **ORCID** https://orcid.org/0000-0003-3206-0131

PARAMETRIC DETERMINATION OF OPTIMAL GEOMETRY OF HEAVY ELECTRIC MACHINE BEARING

The article is devoted to the process of parametric design and the transition to multiparametric design when determining the optimal geometry of the roller bed of a heavy electric machine, using the example of a turbogenerator. The author analyzed the current state of various aspects of the development and calculation of bearing assemblies of powerful various types of electric machines (including powerful and heavy ones). As a result of this analysis and theoretical review of existing bearing assembly design options, two types of bearing assembly design were outlined, these are a shield bearing and a remote (separately standing) bearing. The main functional area of the bearing assembly operation was determined – this is the place of connection of the bearing housing insert and the rotor shaft neck.

Within the article, a parametric mathematical model for calculating the bearing assembly elements is built that takes into account the multi-physical processes of its operation: mechanical, electrodynamic, and thermal. The model is presented in matrix form and contains both geometric indicators of the design of the bearing shell of a heavy electric machine and indicators of its operating mode, such as the value of the electromechanical deflection of the rotor shaft, the temperature in the working area of the insert, etc.

The author proposed to use the geometric ratio of the bearing insert length to its diameter as a criterion parameter to determine the minimum loss of electrical energy in the bearing support. The resulting energy loss consists of mechanical losses, electrodynamic and additional (associated) losses, which depend on the operating mode of the electric machine. For a heavy turbogenerator, a range of values of the optimal geometry of the above-mentioned ratio of the bearing shell insert has been established, which can be used to perform engineering developments. According to the design results, two patents for bearing supports were obtained, which significantly increase the technological and competitive level of the heavy electric machine.

Keywords*: electromechanical energy converter; wind turbines; parametric design; gas-physical processes; optimization.*

Fig.: 5. Table: 1. References: 14.

Мінко О. М. Параметричне визначення оптимальної геометрії вальниці важкої електричної машини. *Технічні науки та технології*, 2026. № 1(43). С. 323-331. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-323-331.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-332-343
УДК 629.7.05:681.513:004.89

Олег Васильович Середа
аспірант кафедри електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки
Національного університету «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: seredaolegv@gmail.com. **ORCID**: https://orcid.org/0000-0003-2270-0385
Google Scholar: https://scholar.google.com/citations?hl=ru&user=eP1b49cAAAAJ

ФАЗЗІ-РЕГУЛЯТОР У ЗОВНІШНЬОМУ КОНТУРІ СТАБІЛІЗАЦІЇ КРЕНУ КВАДРОКОПТЕРА

У роботі запропоновано модифікований рекурсивний цифровий регулятор зовнішнього контуру стабілізації крену квадрокоптера, аналог [2], у якому адаптація динамічних властивостей здійснюється через фаззі-налаштування еквівалентного частотного параметра w_n. На кожному такті дискретизації фаззі-модуль типу Sugeno-0 формує поточне значення w_n на основі нормованої похибки кута та фільтрованого приросту похибки. Отриманий параметр використовується для параметричного синтезу коефіцієнтів чисельника цифрового регулятора та демпфувальної поправки за методом Акермана [3], тоді як знаменник рекурсивного закону залишається фіксованим. Така побудова дозволяє поєднати переваги рекурсивного цифрового керування [1; 2] з адаптивною зміною швидкодії та жорсткості реакції без структурного ускладнення контуру. Проведено моделювання синтезованої системи та моделювання [1] та [2] мовою програмування Python. Приведено порівняння характеристик.

Ключові слова: *квадрокоптер; зовнішній контур; стабілізація крену; цифровий регулятор; фаззі-логіка; Sugeno-0; адаптація w_n; метод Акермана; енергоефективність.*
Рис.: 5. Табл.: 4. Бібл.: 16.

Актуальність теми дослідження. Постановка теми дослідження викликана необхідністю підвищення якості та енергоефективності в системах управління польотом безпілотних літальних апаратів (БПЛА), враховуючи роботи [1; 2], виникла задача удосконалити запропоновані методи.

Постановка проблеми. Системи автоматичного керування квадрокоптерами повинні забезпечувати одночасно швидке відпрацювання кутових команд, низьке перерегулювання, обмеження пікових навантажень на електромеханічний привід та помірні енергетичні витрати. Класичні цифрові регулятори з фіксованими коефіцієнтами дозволяють досягти високого рівня якості в оптимальних режимах роботи [1; 2], однак при різних режимах польоту часто виникає компроміс між швидкодією системи та енергоефективністю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз доступних публікацій за темою дослідження показав, що в них не розкрите питанням використання адаптивних методів для збереження енергії акумулятора. Огляд сучасних робіт свідчить, що більшість досліджень у сфері стабілізації крену БПЛА зосереджена на підвищенні точності та швидкодії за рахунок складних нелінійних методів: адаптивного зворотного ступінчастого керування [7], режим ковзання зі змінним підсиленням [8], нейронних мереж та гібридних схем “нейромережа–фаззі” [9], а також каскадних моделей предикативного керування [10]. Питання ж адаптивного збереження енергії акумулятора безпосередньо в законі керування зовнішнього контуру крену практично не розглядалося. Роботи, що досліджують взаємозв’язок між агресивністю регулятора і витратою енергії двигунів квадрокоптера під час маневрів, нечисленні [11; 12]. У представлених роботах витрата енергії аналізується переважно ретроспективно, а не лягає в основу синтезу регулятора. Подібну прогалину відзначає і огляд [13], де зазначається, що переважна більшість алгоритмів керування БПЛА оцінюється виключно за показниками якості перехідного процесу, не включаючи явний критерій мінімізації витраченої електричної енергії під час маневру.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. При вирішенні задач оптимізації енергодинамічних процесів в системі електропривода квадрокоптера постало питання уніфікації системи керування електроприводом. При певних умовах роботи регулятора повністю задовольняє поставлені задачі, але система стає «негнучкою». Для розширення умов керування на часі треба вводить адаптивне керування, розширюючи

© О. В. Середа, 2026

можливості стандартного цифрового адаптивного фільтра. Попри широке застосування фаззі-логіки для адаптивного налаштування коефіцієнтів ПІД-регуляторів квадрокоптерів [7; 14; 15], використання фаззі-модуля типу Sugeno-0 безпосередньо для параметричного синтезу коефіцієнтів рекурсивного цифрового регулятора через узагальнений частотний параметр wn залишається недослідженим.

Мета дослідження є розробка, математичне обґрунтування та чисельне дослідження, програмне моделювання модифікованого рекурсивного цифрового фаззі-регулятора контуру кута стабілізації крену квадрокоптера з адаптацією параметра w_n, включаючи аналіз показників якості та енергоефективності.

Виклад основного матеріалу дослідження. Перспективним шляхом для покращення властивостей систем керування є введення адаптації параметрів регулятора відповідно до поточного стану системи [3; 4]. У роботі запропоновано підхід, у якому адаптація системи керування здійснюється через зміну узагальненого частотного параметра w_n. Такий підхід є зручним з фізичної точки зору, оскільки w_n прямо пов'язаний із заданою швидкістю реакції системи [5]. Поточне значення w_n формується фаззі-регулятором типу Sugeno-0 [4] на основі нормованої похибки та її фільтрованого приросту, після чого за цим параметром виконується параметричний синтез коефіцієнтів чисельника рекурсивного закону та коефіцієнта демпфування. Знаменник регулятора залишається фіксованим, що забезпечує сталість базової структури алгоритму.

Рекурсивний цифрового фаззі-регулятора в контурі стабілізації крену квадрокоптера, працює за схемою послідовних етапів: оцінювання стану системи за $e[k]$ та $\Delta e_f[k]$, фаззі-адаптацію параметра $w_n(k)$ через модуль Sugeno-0 [4], параметричний синтез коефіцієнтів за методикою Акерманном [3] та формування рекурсивної керуючої дії.

Оцінювання стану системи визначається за наступним алгоритмом, на k-му кроці дискретизації похибка $e[k]$ визначається як різниця між еталонним та виміряним кутом:

$$e[k] = a_{ref}[k] - a[k] \quad (1)$$

де: $a_{ref}[k]$ – еталонний кут, рад;

$a[k]$ – виміряний кут, рад.

Приріст похибки $\Delta e[k]$ задається різницею між поточним і попереднім значенням:

$$\Delta e[k] = e[k] - e[k-1] \quad (2)$$

де: $e[k]$ – поточне значення похибки;

$e[k-1]$ – попереднє значення похибки.

Для зменшення чутливості до шумів вимірювання використовується фільтрація приросту похибки за рекурсивним законом першого порядку [4]:

$$\Delta e_f[k] = (1 - a_f) \cdot \Delta e[k] + a_f \cdot \Delta e_f[k-1] \quad (3)$$

де: $a_f \in [0,1]$ – коефіцієнт згладжування a_f;

$\Delta e[k]$ – поточний приріст похибки;

$\Delta e_f[k-1]$ – попереднє відфільтроване значення;

$\Delta e_f[k]$ – результат на поточному кроці.

Для забезпечення роботи фаззі-системи в діапазоні [-1,1] використовуються нормовані змінні, E_{max} та DE_{max}, виконують роль масштабуючих коефіцієнтів:

$$E[k] = sat\left(\frac{e[k]}{E_{max}}, -1,1\right). \quad (4)$$

$$DE_f[k] = sat\left(\frac{\Delta e_f[k]}{DE_{max}}, -1,1\right). \quad (5)$$

Масштабуючі коефіцієнти коригують максимальне значення похибки та кута. У цій задачі виконується значення $E_{max} = 30°$ (приймемо 30°, як типове значення), оператор $sat(x, -1{,}1)$ обмежує змінну в межах від −1 до 1.

Вибір моделі Sugeno-0 обґрунтований мінімізацією обчислювальної складності алгоритму за рахунок використання константних значень у базі правил, що є критичним для систем реального часу на базі мікроконтролерів. Застосування методу зваженого середнього при дефазифікації забезпечує диференційованість поверхні виводу та відсутність розривів керуючого сигналу, а математична структура моделі дозволяє виконати аналітичну перевірку умов стійкості системи в замкненому контурі [6]. Використовується фаззі-модуль типу Sugeno-0 [4; 6] з двома входами $E[k]$ і $DE_f[k]$. Для кожного входу вводяться три терми: N (негативний), Z (нульовий), P (позитивний).

Таблиця 1 – Параметри трикутних функцій належності вхідних змінних $E, DE_f \in [-1{,}1]$

Терм	Мітка	a	b	c
Negative	N	−1,0	−0,5	0,0
Zero	Z	−0,5	0,0	0,5
Positive	P	0,0	0,5	1,0

Трикутна функція належності для вхідних змінних E та DE_f:

$$tri(x; a, b, c) = max\left(min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right), \quad (6)$$

де $a < b < c$ – параметри лівого, центрального та правого вершин трикутника.

Рисунок 1 ілюструє три компоненти фаззі-системи [4]: функції належності термів N, Z, P; поверхню виводу $s(E, DE_f)$, $w_n[k]/wn_{base}$ як функцію двох входів (E, DE_f). Карта підтверджує логічну поведінку: у правому верхньому куті ($E > 0, DE_f > 0$) wn_{scale} = 1,5 (агресивне регулювання), у правому нижньому ($E < 0$, $DE_f < 0$, система наближається до заданого значення) $w_{n\,scale} = 0{,}7$ (ощадливе регулювання).

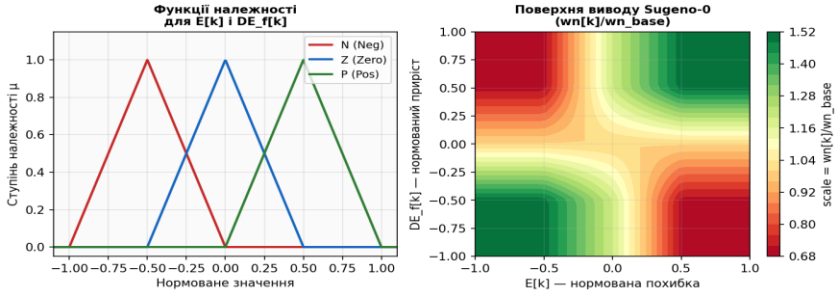


Рис. 1. Функції належності, поверхня виводу Sugeno-0

База правил Sugeno-0 задає таблицю масштабних множників w_n для базового параметра $w_{n_{base}}$. Таблиця 2 містить числові значення, де рядки відповідають термам E, а стовпці – DE_f:

Таблиця 2 – Масштабний множник для базового параметра $w_{n\,base}$

$E \setminus DE_f$	DE = N	DE = Z	DE = P
E = N	1,5	1,0	0,7
E = Z	1,2	1,0	1,2
E = P	0,7	1,0	1,5

Поточне значення частотного параметра визначається Sugeno-0-дефаззифікацією:

$$w_n(k) = wn_{base} \cdot \frac{(\sum_i w_{ij}[k] \cdot s_{ij})}{\sum_i w_{ij}[k]}, \quad (7)$$

де $w_{ij}[k] = \mu_{ij}$ – ваговий коефіцієнт $i-j$ -го правила;

s_{ij} – відповідний масштаб з табл. 2.

У формулі (7) слід урахувати особливий граничний випадок, який реалізується за $E = \pm 1$, граничний випадок, сума ступенів належності всіх трьох термів рівна 0. З метою усунення зазначеної невизначеності доцільно задати окреме граничне правило, при $E = -1$ результат дефазифікації приймається рівним значенню, асоційованому з лівим крайнім термом, а при $E = +1$ – значенню, асоційованому з правим крайнім термом. Відповідно, стандартний вираз дефазифікації використовується лише в межах інтервалу $E \in (-1; 1)$, тоді як на межах області визначення застосовується спеціально введене правило, що гарантує коректність чисельної реалізації.

На рис. 2 представлено тривимірні поверхні залежностей $w_n[k]$ та $\mu_0[k]$, від пари входів (E, DE_f)

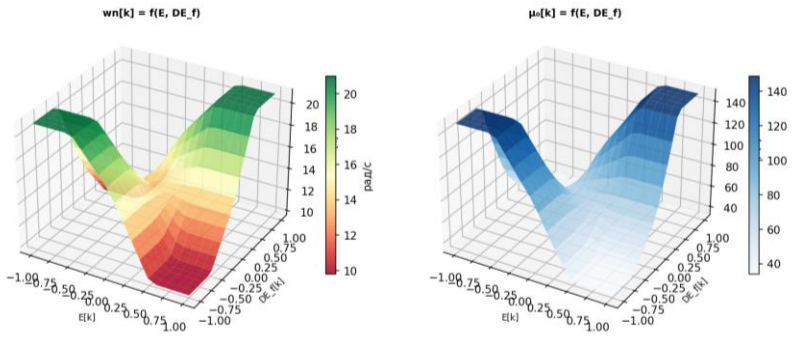


Рис. 2. 3D-поверхні $w_n[k]$ та $\mu_0[k]$

Після визначення поточного значення еквівалентного частотного параметра $\omega_{n,eff}[k]$ виконується параметричний синтез коефіцієнтів адаптивного чисельника регулятора. Для цього використовується двовимірна модель каналу крену у просторі станів. Вектор стану вибираємо у вигляді

$$x[t] = [\alpha(t), \Omega(t)]^T, \quad (8)$$

де $\alpha(t)$ – кут крену, рад;

$\Omega(t)$ – кутова швидкість квадрокоптера, рад/с.

Безперервна модель зовнішнього контуру має вигляд:

$$\dot{\alpha}(t) = \Omega(t), \qquad \dot{\Omega}(t) = -kd \cdot \Omega(t) + B_a \cdot u(t), \quad (9)$$

або запишемо в матричній формі:

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t), \quad (10)$$

де $A = [[0,1], [0, -kd]]$, $B = [0, B_a]^T$.

Для реалізації цифрового закону керування модель (10) дискретизується з періодом $T = T_{pwm}$. У результаті отримуємо дискретну систему:

$$x[k+1] = A_d \cdot x[k] + B_d \cdot u[k], \quad (11)$$

де $A_d = e^{AT}$;

$B_d = \int_0^T e^{(A\tau)} \cdot B \cdot d\tau$.

Для системи другого порядку матриця керованості має вигляд:

$$M_c = [B_d\ ,\ A_a \cdot B_d]. \quad (12)$$

Умова застосовності методу Акермана полягає в повному ранзі матриці M_c: $rank(M|c) = 2$. Бажані динамічні властивості задаються через $\omega_{n,eff}[k]$ та коефіцієнт демпфування ζ. Для безперервної моделі цільовий характеристичний поліном записується як:

$$p_c(s) = s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \omega_{n,eff}[k] \cdot s + \omega_{n,eff}^2[k] \quad (13)$$

Після відображення бажаних полюсів у z-площину

$$z_{1,2}[k] = e^{s_{1,2} \cdot T} \quad (14)$$

де $s_{1,2} = -\zeta \cdot \omega_{n,eff}[k] \pm j \cdot \omega_{n,eff}[k] \cdot \sqrt{1-\zeta^2}$.

Одержуємо дискретний цільовий поліном:

$$p_d(z) = (z - z_1[k]) \cdot (z - z_2[k]) = z^2 + a_1[k] \cdot z + a_0[k] \quad (15)$$

Тоді матриця бажаного полінома для методу Акермана задається як:

$$p_d(A_d) = A_d^2 + a_1[k] \cdot A_d + a_0[k] \cdot I \quad (16)$$

Вектор зворотного зв'язку за станом визначається формулою Акермана:

$$K[k] = [01] M_c^{-1} p_d(A_d), \quad (17)$$

де $K[k] = \left[k_1[k]\ k_2[k]\right]$.

Відповідно, закон керування набуває вигляду

$$u[k] = -K[k] \cdot x[k] = -k_1[k] \cdot \alpha[k] - k_2[k] \cdot \Omega[k] \quad (18)$$

Так як у роботі використовується рекурсивний цифровий регулятор зі зворотним зв'язком, параметри зворотного зв'язку далі приводяться до коефіцієнтів адаптивного чисельника. Для прийнятої структури регулятора:

$$u[k] = \mu_0[k] \cdot e[k] + \mu_1[k-1] \cdot e[k-1] + \mu_2[k-2] \cdot e[k-2] - \eta_1 \cdot u[k-1] - \eta_2 \cdot u[k-2] \quad (19)$$

коефіцієнти $\mu_0[k]$, $\mu_1[k]$, $\mu_2[k]$ є функціями поточного значення $\omega_{n,eff}[k]$, а отже й функціями цільових дискретних полюсів $z_1[k]$, $z_2[k]$. Алгоритм обчислення $\mu_0[k]$, $\mu_1[k]$, $\mu_2[k]$ та $k_a[k]$ виконується за формулами формули (23) – (27). Приведемо ідентифікацію показників:

$$\mu_0[k] = f_0\left(\omega_{n,eff}[k], \zeta, T, B_a, k_d\right); \quad (20)$$

$$\mu_1[k] = f_1\left(\omega_{n,eff}[k], \zeta, T, B_a, k_d\right); \quad (21)$$

$$\mu_2[k] = f_2\left(\omega_{n,eff}[k], \zeta, T, B_a, k_d\right). \quad (22)$$

Тобто при зміні $\omega_{n,eff}[k]$, сформованого фаззі-модулем, змінюються бажані полюси дискретної системи, а через зміну полюсів змінюються коефіцієнти адаптивного чисельника $\mu_0[k]$, $\mu_1[k]$, $\mu_2[k]$. Знаменник рекурсивного закону при цьому залишається фіксованим ($\beta = 0.05$, η_1, η_2), що забезпечує сталість базової структури. Ототожнення $k_1[k] \equiv \mu_0[k]$ та $k_2[k] \equiv k_a[k]$ обґрунтовано формулою (27).

У запропонованому алгоритмі фаззі-модуль не змінює структуру регулятора, а лише адаптує параметр $\omega_{n,eff}[k]$, через який у кожний момент часу перебудовується бажаний поліном формула (15) і, відповідно, коефіцієнти $\mu_0[k]$, $\mu_1[k]$, $\mu_2[k]$. Це забезпечує компроміс між швидкодією, демпфуванням та енергоспоживанням у різних режимах маневру БПЛА.

Нижче наведено повний покроковий алгоритм, що показує перетворення від $K[k] = [k_1, k_2]$, у результаті отримаємо, рівняння (17) – (18) для коефіцієнтів цифрового регулятора $\mu_0[k]$, $\mu_1[k]$, $\mu_2[k]$ та $k_a[k]$ рівняння (20) – (22). Запишемо параметри системи: $B_a = \frac{k_0 \cdot L_{ak} \cdot 2 \cdot \omega_{hos}}{I_{hoss}} = 2{,}7c^{-2}$, $k_a = b_{hoss}/I_{hoss} = 1{,}0c^{-1}$, $T = 0{,}005c$, $\beta = 0{,}05$, $\zeta = 0{,}9$.

ZOH-дискретизація моделі платформи, $A = \left[[0{,}1],\ [0, -k_a]\right]$, $B = [0,\ B_a)]^T$матриці дискретної системи формула (11) мають вигляд:

$$A_a = \left[\left[1, \frac{(1-e^{-k_a D})}{k_a}\right], [0, e^{-k_a D}]\right] B_a = \left[\left[B_a,\ (\frac{T}{k_a} + \frac{(e^{-k_a D}-1)}{k_a^2})\right], \left[B_a,\ \frac{(1-e^{-k_a D})}{k_a}\right]\right] \quad (23)$$

Розрахунок згідно з формулою (23) показує наступні значення: $A_a = \left[[0,\ 0.004988],\ [0,\ 0.995012]\right]$, $B_a = \left[[3.369 \cdot 10^{-5}], [1.347 \cdot 10^{-2}]\right]$.

Перевірка керованості. Матриця $M_0 = [B_a |\ A_a \cdot B_a]$. Аналітично при $k_a = 0$ (спрощена модель) $det\ (M_0) = -B_a^2 \cdot T^3$, який відповідно $de\ t(M_0) \neq 0$ для будь-яких $B_a \neq 0$ та $T \neq 0$. Числово для точної ZOH-дискретизації ($k_a = 1$), детермінант значить:

$$det(M_0) = -9{,}067 \cdot 10^{-7} \neq 0; rank(M_0) = 2 \quad (24)$$

Бажані полюси та поліном $p_a(z)$ для $\omega_n[k] = 14\,\text{рад}/c$ (базовий приклад, для ζ = 0,9): $\omega_d = \omega_n\sqrt{(1-\zeta^2)}$ розрахуємо значення $\omega_d = 6{,}103\,\text{рад/с}$, звідси: $z_{1,2} = e^{-\zeta \cdot \omega_n \cdot T} \cdot \left(cos(\omega_d \cdot T) \pm j \cdot sin(\omega_d \cdot T)\right) = 0{,}9385 \pm J \cdot 0{,}0286$, отримаємо результат $|z_1| = 0{,}9389 < 1$. Коефіцієнти полінома формула (15): $a_1[k] = -2 \cdot R(z_1) = -1.8770$, $a_0[k] = |z_1|^2 = 0.8816$.

Обчислення $K[k]$ за формулою Акерманна формула (17), $p_a(A_a) = A_a^2 + a_1[k] \cdot A_a + a_0[k] \cdot I$. Отримаємо результат: $p_a(A_a)[2,\ 2] = 0.004013$. Відповідно вектор K:

$$K = [0{,}1] \cdot M_0^{-1} \cdot p_a(A_a) \quad (25)$$

Отримаємо числові значення: $K[k] = [k_1, k_2] = 68{,}35,\ 8{,}592$.

Зв'язок $K[k]$ з коефіцієнтами IIR-чисельника, перша компонента $k_1[k]$ є прямим підсиленням по похибці ($k_1 \equiv \mu_0$), друга $k_2[k]$ – демпфувальним коефіцієнтом ($k_2 \equiv k_a$). Щоб відобразити динаміку знаменника (β-фільтр), коефіцієнти $\mu_1[k]$ та $\mu_2[k]$ обчислюються через IIR-ваги k_{1f} та k_{2f}, що визначаються параметром $\beta = 0.05$ та залишаються незмінними:

$$k_{1f} = \beta - 1 + e^{-\beta}/\beta^2,\ k_{2f} = \left(1 - e^{-\beta(1+\beta)}\right)/\beta^2; \quad (26)$$

$$\mu_0[k] = k_1[k],\ \mu_1[k] = k_{1f} \cdot \mu_0[k],\ \mu_2[k] = e^{-\beta} \cdot k_{2f} \cdot \mu_0[k],\ k_a[k] = k_2[k]. \quad (27)$$

Формула (27) задає правило обчислення коефіцієнтів адаптивного чисельника на поточному кроці k. У рекурсивному законі керування ці коефіцієнти використовуються з урахуванням часових індексів: $\mu_0[k]$ множиться на $e[k]$, тоді як коефіцієнти при $e[k-1]$ та $e[k-2]$ повинні відповідати тим тактам, на яких вони були сформовані. Отже, при змінних коефіцієнтах реалізація закону керування потребує збереження попередніх значень $\mu_1[k]$ та $\mu_2[k]$. Розрахунок для k_{1f} та k_{1f}, становить $k_{1f} =\ 0{,}49177$, $k_{2f} = 0{,}48364$. Таблиця 3 наводить числові значення коефіцієнтів для чотирьох характерних масштабів $w_{n\ scale} \in \{0.7, 1.0, 1.2, 1.5\}$, отриманих за формулами (23) – (27) при $w_{n\ base} = 14\,\text{рад/с}$.

Таблиця 3 – Значення μ_0, μ_1, μ_2, k_a для чотирьох масштабів w_n ($w_{n\ base}$ = 14 рад/с, ζ = 0,9, β = 0,05, T = 0,005 с)

scale	w_n (рад/с)	$\mu_0[k]$	$\mu_1[k]$	$\mu_2[k]$	$k_a[k]$
0,7	9,8	34,13	16,78	15,70	5,984
1,0	14,0	68,35	33,61	31,44	8,592
1,2	16,8	97,20	47,80	44,72	10,293
1,5	21,0	149,06	73,30	68,58	12,790

Формули (23) – (27) та табл. 3 замикають ланцюг синтезу для спрощеної моделі: фаззі-модуль формує w_n[k], перетворення дають$K[k] = [\mu_0, k_a]$, формула (27) перетворює $\mu_0 \rightarrow \mu_1,\ \mu_2$ через незмінні ваги k_{1f}, k_{2f}. Потрібно врахувати важливе зауваження:

спрощена модель $k_d = 0$ дає похибку μ₀ не більше 0.25 %, k_a не більше ніж 4,05 %, що обґрунтовує її застосування ($b_{roll} \cdot T = 0{,}005 < 1$).

Знаменник рекурсивного цифрового закону зберігається фіксованим і визначається параметром $\beta = 0.05$. Коефіцієнти η_1 та η_2 обчислюється один раз під час ініціалізації:

$$\eta_1 = \frac{(b_1+b_2)}{(b_0^2+b_1^2+b_2^2)}, \quad \eta_2 = \frac{b_0}{(b_0^2+b_1^2+b_2^2)}, \tag{28}$$

де b_0, b_1, b_2 – коефіцієнти дедбіт-полінома відповідно до параметра β.

Внутрішня рекурсивна змінна регулятора:

$$DU[k] = e[k] - \eta_1 \cdot DU[k-1] + \eta_2 \cdot DU[k-2], \tag{29}$$

де $DU[k]$ – поточне вихідне значення, $e[k]$ – вхідний сигнал, $DU[k-1]$, $DU[k-2]$ – значення, які були розраховані на попередньому та позаминулому кроках. Ця частина структури не адаптується в часі, що стабілізує форму цифрового закону та зменшує обчислювальну складність реального впровадження.

Керуюче коригування до швидкості двигунів у каналі крену:

$$\Delta\omega[k] = \mu_0[k] \cdot DU[k] + \mu_1[k] \cdot DU[k-1] + \mu_2[k] \cdot DU[k-2] - k_a[k] \cdot \Omega[k], \tag{30}$$

де $\Omega[k]$ – поточна кутова швидкість крену, рад/с , μ_0, μ_1, μ_2 – коефіцієнти.

З урахуванням фізичних обмежень частоти обертання ротора вводиться поняття насичення:

$$\Delta\omega_{sat}[k] = sat(\Delta\omega[k], -\Delta\omega_{sat}, \Delta\omega_{sat}). \tag{31}$$

Опорна швидкість роторів двигунів, з урахуванням формула (30) та формула (31) визначається як:

$$\omega_{ref}[k] = max\,(\omega_{min}, \omega_{base}[k] + \Delta\omega_{sat}). \tag{32}$$

Замкнена система цифрового фаззі-регулятора зовнішнього контуру формує опорну швидкість $\omega_{ref}[k]$, внутрішні контури швидкості і струму з дедбіт-налаштуванням за Ципкіним [1; 2] перетворюють це завдання на напругу ШІМ-інвертора. Модель БДПС та платформи визначає динамічну відповідь системи. Зворотний зв'язок здійснюється через виміряння кута $\alpha[k]$ та кутової швидкості $\Omega[k]$ платформи. Модель БДПС описується рівняннями електричного кола та механіки ротора:

$$L \cdot \frac{dI}{dt} = U(t) - K_e \cdot \omega(t) - R \cdot I(t)\ , J \cdot \frac{d\omega}{dt} = K_t \cdot I(t) - c_1 \cdot \omega^2(t), \tag{33}$$

де прийняті значення для моделювання на $L = 0.3$мГн, $R = 0.15$Ом, $K_e = K_t = 0.0118\text{Н} \cdot \text{м/А}$, $J = 1.0 \cdot 10^{-4}\text{кг} \cdot \text{м}^2$, $c_1 = 1.5 \cdot 10^{-7}\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{\,2}/\text{рад}^{\,2}$ – коефіцієнт аеродинамічного опору пропелера. Одноосьова модель крену платформи має наступний вигляд:

$$I_{roll} \cdot \frac{d\Omega}{dt} = k_T \cdot L_{arm} \cdot (\omega^2 - \omega_{hov}^2) - b_{roll} \cdot \Omega, \tag{34}$$

де $I_{roll} = 5 \cdot 10^{-3}\text{кг} \cdot \text{м}^2$ – момент інерції, $b_{roll} = 5 \cdot 10^{-3}\text{Н} \cdot \text{м} \cdot c/\text{рад}$ – аеродинамічне демпфування.

Для чисельного розв'язку нелінійних рівнянь (33) – (34) використовується метод Рунге-Кутта четвертого порядку. Для стану $x(t) = [I(t), \omega(t), \alpha(t), \Omega(t)]^T$ вектор оновлення за крок dt записується:

$$k_1 = f(x_n);\ k_2 = f(x_n + 0.5 \cdot dt \cdot k_1);\ \dots;\ x_{n+1} = x_n + (dt/6) \cdot (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4). \tag{35}$$

Крок інтегрування $dt = 50$мкс обрано в 40 разів менше за електромагнітну постійну часу $T_e = \frac{L}{R} = 2$мс, що забезпечує 40 кроків на кожен такт ШІМ ($T_{pwm} = 5\text{мс} = 100 \cdot dt$). Це відповідає вимозі стабільності RK4 для системи жорсткістю $s = T_{pwm}/T_e \approx 500$.

Стійкість системи, хоча адаптивна зміна $w_n[k]$ робить систему нестаціонарною, стійкість можна оцінити через два еквівалентні підходи: полюсний аналіз для замороженого w_n та аналіз граничних значень адаптації. Якщо при кожному фіксованому значенні w_n замкнена система асимптотично стійка, а зміна w_n між тактами обмежена, відповідно нестаціонарна система зберігає стійкість.

Функція передачі замкненого контуру при фіксованому $w_n = w_n[k]$ має характеристичний поліном:

$$\Delta(z) = z^2 + p_1[k] \cdot z + p_2[k] = 0, \quad (36)$$

де $p_1[k] = -2 \cdot e^{(-\zeta \cdot w_n[k] \cdot T) \cdot cos\,(\omega_d[k] \cdot T)}$, $p_2[k] = e^{(-2 \cdot \zeta \cdot w_n[k] \cdot T)}$. Обидва корені z_1, z_2 лежать всередині одиничного кола Z-площини для будь-якого значення $w_n[k] > 0$ та $\zeta > 0$, оскільки $|z|^2 p_2[k] = e^{(-2 \cdot \zeta \cdot w_n[k] \cdot T)} < 1$. Для будь-яких $\zeta > 0$, $w_n > 0$. Числове значення (ζ = 0.9, T = 0.005 с):

$$w_n = 9.8 \text{ рад/с}: z_1 = 0{,}9566 + \text{j}0{,}0204, |z_1| = 0{,}9569 < 1;$$
$$w_n = 21 \text{ рад/с}: z_1 = 0{,}9089 + \text{j}0{,}0416, |z_1| = 0{,}9098 < 1.$$

Обмеження Δw_n – максимальна зміна w_n за один такт: $w_{n\,max} = 21{,}0 - 9{,}8 = 11{,}2$ рад/с. Відповідна зміна $|z|$: $\Delta|z| = 0{,}9098 - 0{,}9569 = -0{,}047$ (менше 5 % від радіуса кола). Усі полюси залишаються в одиничному колі – система стійка [3].

Частотне дискретування, критерій [5]: $w_n[k] \cdot T < \pi/2 \approx 1.57$. Для $w_{n\,max}$: $21{,}0 \cdot 0{,}005 = 0{,}105 < 1.57$ – запас 15х. Таким чином виконано три умови: система стійка в діапазоні $w_n \in [9{,}8; 21{,}0]$ рад/с при ζ = 0.9, T = 0.005 с.

На рис. 3 наведено перехідний процес для ступінчастої зміни кута крену 0° – 10°. Виконано моделювання системи керування квадрокоптера за допомогою мови програмування Python. Представлені значення для регулятора, реалізація структури [1] за допомогою алгоритму Акермана, а також реалізація цифрового фільтра [2]. Як видно з графіка, найменший час встановлення ts має реалізація цифрового фільтра [2] (ts ≈ 2,52 T, еталон 3 T). Результат цифрового адаптивного фаззі контролера показав значення ts ≈ 3,38 T. Однак при цьому має значно вищу якість перегулювання 0,15 % проти 0,72 % у цифрового фільтра [2] та меншій витраті енергії для перерегулювання. Таблиця 4 підсумовує числові результати.

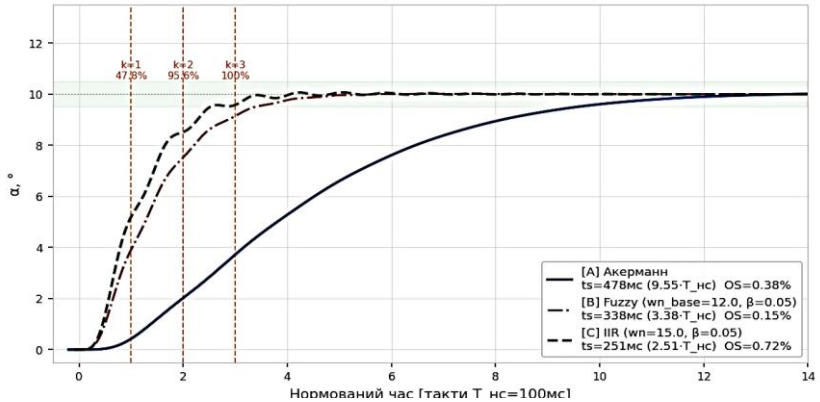


Рис. 3. Перехідний процес фаззі-регулятора, ступінчаста зміна 0°-10°

Таблиця 4 – Порівняння регуляторів, маневр 0° – 10°

Показник	Реалізація алгоритму [1]	Фаззі регулятор	Цифровий фільтр [2]	Задане значення
Такти, ts	9,56	3,38	2,52	≤ 3,0
Перерегулювання , %	0,38	0,15	0,72	< 5
E_{man}, Дж	0,166	0,620	1,693	мін.
Максимальний струм I_{max}, А	2,1	7,2	11,8	< 15

На рис. 4 та рис. 5 продемонстровано роботу регулятора для шести режимів: малих і великих ступінчастих змін, реверсів. З діаграм на рисунків видно, що при перерегулюванні, синтезований регулятор має більший ts порівняно з реалізацією регулятора на основі [2], але E_{man} у 2,7 раза менше, ніж реалізація регулятора на основі [2] (0,620 Дж проти 1,693 Дж). Детальне числове порівняння – табл. 4.

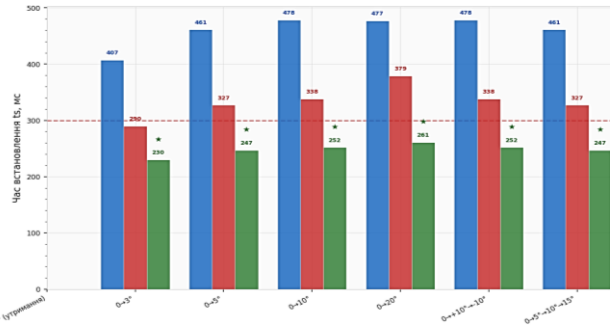


Рис. 4. Затрати часу для перерегулювання, вказано шість режимів маневру

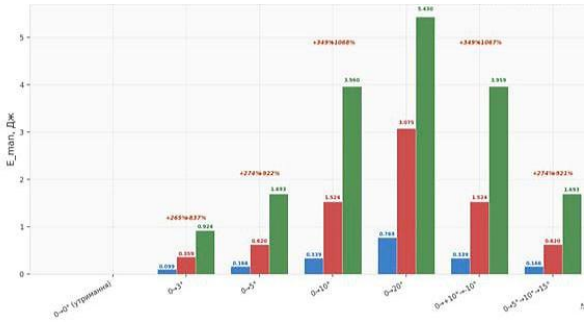


Рис. 5. Затрати енергії для перерегулювання, вказано шість режимів маневру

Для визначення енергоефективності використано поняття “витрати енергії” – це кількість енергії яка витрачається на відхилення від стаціонарного режимі “режим зависання”, електрична енергія маневру E_{man}:

$$E_{man} = \int_0^T \max(0, |U(t)| \cdot I(t) - P_{hover})\, dt, \tag{37}$$

де $U(t), I(t)$ – напруга та струм БДПС (крок dt = 50 мкс);

P_{hover} – потужність яка витрачається на утримання у стаціонарному режимі. розраховується наступним чином $P_{hover} = U_{eq} \cdot I_{eq} \approx 4.25$ Вт.

Висновки. У роботі розроблено модифікований рекурсивний цифровий фаззі-регулятор зовнішнього контуру стабілізації крену квадрокоптера. Його особливістю є те, що фаззі-модуль Sugeno-0 [4] адаптує узагальнений частотний параметр w_n, який надалі використовується для параметричного синтезу коефіцієнтів чисельника та демпфувальної складової за методом Акермана [3]. Знаменник рекурсивного закону залишається незмінним, що забезпечує стабільну базову структуру алгоритму.

Запропонований підхід поєднує адаптивність фаззі-логіки [4] зі структурною простотою рекурсивного цифрового закону: знаменник фіксований, чисельник адаптується через параметричний синтез [3].

За даними табл. 4 (тестування на виконання маневру перерегулювання 0°→10°) система побудована на основі модифікованого рекурсивного цифрового фаззі-регулятора має показники перегулювання: 0,15 % < 1 %, ts = 3,38 Т. Відносно реалізації регулятора на основі [2] ts = 2,52 Т < 3 Т, OS = 0,72 %. Перевага рекурсивного цифрового фаззі-регулятора найменше перегулювання, але час встановлення гірший (ts ≤ 3,5 Т). Перевага реалізації регулятора на основі [2] – найменший час встановлення ts. Для маневрів до 20° аналогічна

тенденція підтверджується діаграмами на рис. 4. Що показують високу швидкодію, але не задовольняє умову, проте показує досить високий показник якості перегулювання.

Фаззі-адаптація w_n знижує енергію маневру E_{man}, рівняння (37), в порівнянні з реалізацією цифрового фільтру [2]. У тесті перегулювання 0° - 10° E_{man}= 0.620 Дж проти E_{man}= 1,693 Дж – затрачено на 63 % менше енергії. Порівняно з реалізацією системи керування [1] (0.166 Дж) рекурсивний цифровий фаззі-регулятор витрачає більше енергії через вищу агресивність у фазі розгону, однак у 2,7 раза менше ніж реалізацією цифрового фільтра [2]. Загальну діаграму по шести режимах показано на рисунку 5.

Згідно з показниками якості перерегулювання та затраченої енергії система побудована на основі модифікованого рекурсивного цифрового фаззі-регулятора зберігає баланс між швидкодією та енергозбереженням. Проте дає підґрунтя для подальших досліджень в цьому напрямку.

Алгоритм придатний для дискретної реалізації у вбудованих системах керування квадрокоптерами [2].

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті.

Під час написання цього матеріалу автор використовував Claude (Anthropic) для допомоги у структуруванні та оформленні тексту статті. Після використання цього інструменту автор переглянув та відредагував зміст за потреби і взяв на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Денисов, Ю. О., Шаповалов, О. М., Середа, О. В., & Куц, Е. (2018). Оптимізація енергодинамічних процесів у системі керування приводом стабілізації польоту безпілотного літального апарата. *Технічні науки та технології*, (3(13)), 187–193.

2. Денисов, Ю. О., Городній, О. М., & Середа, О. В. (2019). Синтез регулятора контуру кута крену системи управління квадрокоптера з компенсуючим регулятором контуру струму. *Технічні науки та технології*, (4(18)), 169–174.

3. Ackermann, J. (1993). *Robust control: Systems with uncertain physical parameters*. Springer.

4. Passino, K., & Yurkovich, S. (1998). *Fuzzy control*. Addison-Wesley.

5. Ogata, K. (2010). *Modern control engineering* (5th ed.). Prentice Hall.

6. Takagi, T., & Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, *SMC-15*(1), 116–132. https://doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313399.

7. Hassani, V., Tjahjowidodo, T., & Do, T. N. (2024). Performance evaluation of control strategies for autonomous quadrotors: A review. Complexity, 2024, 8820378. https://doi.org/10.1155/2024/8820378.

8. Ghasemi, A., & Azimi, M. M. (2023). Adaptive fuzzy PID control based on nonlinear disturbance observer for quadrotor. *Journal of Vibration and Control, 29(7–8*), 1952–1966. https://doi.org/10.1177/10775463221089734.

9. Tran, V. P., Mabrok, M. A., Garratt, M. A., & Petersen, I. R. (2021). Hybrid adaptive negative imaginary–neural–fuzzy control with model identification for a quadrotor. *IFAC Journal of Systems and Control, 16,* 100156. https://doi.org/10.1016/j.ifacsc.2021.100156.

10. Okulski, M., & Lawrynczuk, M. (2022). How much energy do we need to fly with greater agility? Energy consumption and performance of an attitude stabilization controller in a quadcopter drone: A modified MPC vs. PID. *Applied Sciences*, 12(18), 9390. https://doi.org/10.3390/app12189390.

11. Wang, Y., Wang, Y., & Ren, B. (2022). Energy saving quadrotor control for field inspections. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 52(3), 1768–1777. https://doi.org/10.1109/TSMC.2020.3034968.

12. Strbac, B., Cavar, I., & Jakus, D. (2022). Quadrotor model for energy consumption analysis. *Energies, 15(19)*, 7136. https://doi.org/10.3390/en15197136.

13. Idrissi, M., Salami, M., & Annaz, F. (2022). A review of quadrotor unmanned aerial vehicles: Applications, architectural design and control algorithms. *Journal of Intelligent & Robotic Systems, 104(1),* 22. https://doi.org/10.1007/s10846-021-01527-7.

14. Melo, A. G., Andrade, F. A. A., Guedes, I. P., Carvalho, G. F. C., Zachi, A. R. L., & Pinto, M. F. (2022). Fuzzy gain-scheduling PID for UAV position and altitude controllers. *Sensors, 22(6*), 2173. https://doi.org/10.3390/s22062173.

15. Nordeen, A., Mohd Basri, M. A., & Mohamed, Z. (2023). Real-time implementation of an adaptive PID controller for the quadrotor MAV embedded flight control system. *Aerospace*, 10(1), 59. https://doi.org/10.3390/aerospace10010059.

16. Shen, S., Xu, J., & Xia, Q. (2022). A fuzzy backstepping attitude control based on an extended state observer for a tilt-rotor UAV. *Aerospace, 9(11),* 724. https://doi.org/10.3390/aerospace9110724.

References

1. Denysov, Yu. O., Shapovalov, O. M., Sereda, O. V., & Kuts, E. (2018). Optymizatsiia enerhodynamichnykh protsesiv u systemi keruvannia pryvodom stabilizatsii polotu bezpilotnoho litalnoho aparata [Optimization of energy-dynamic processes in the control system of the flight stabilization drive of an unmanned aerial vehicle]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical Sciences and Technologies*, (3(13)), 187–193.

2. Denysov, Yu. O., Horodnii, O. M., & Sereda, O. V. (2019). Syntez rehuliatora konturu kuta krenu systemy upravlinnia kvadrokoptera z kompensuiuchym rehuliatorom konturu strumu [Synthesis of the roll-angle loop controller of a quadcopter control system with a compensating current-loop controller]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical Sciences and Technologies*, (4(18)), 169–174.

3. Ackermann, J. (1993). *Robust control: Systems with uncertain physical parameters*. Springer.

4. Passino, K., & Yurkovich, S. (1998). *Fuzzy control*. Addison-Wesley.

5. Ogata, K. (2010). *Modern control engineering* (5th ed.). Prentice Hall.

6. Takagi, T., & Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, *SMC-15*(1), 116–132. https://doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313399.

7. Hassani, V., Tjahjowidodo, T., & Do, T. N. (2024). Performance evaluation of control strategies for autonomous quadrotors: A review. Complexity, 2024, 8820378. https://doi.org/10.1155/2024/8820378.

8. Ghasemi, A., & Azimi, M. M. (2023). Adaptive fuzzy PID control based on nonlinear disturbance observer for quadrotor. *Journal of Vibration and Control, 29(7–8*), 1952–1966. https://doi.org/10.1177/10775463221089734.

9. Tran, V. P., Mabrok, M. A., Garratt, M. A., & Petersen, I. R. (2021). Hybrid adaptive negative imaginary–neural–fuzzy control with model identification for a quadrotor. *IFAC Journal of Systems and Control, 16,* 100156. https://doi.org/10.1016/j.ifacsc.2021.100156.

10. Okulski, M., & Lawrynczuk, M. (2022). How much energy do we need to fly with greater agility? Energy consumption and performance of an attitude stabilization controller in a quadcopter drone: A modified MPC vs. PID. *Applied Sciences*, 12(18), 9390. https://doi.org/10.3390/app12189390.

11. Wang, Y., Wang, Y., & Ren, B. (2022). Energy saving quadrotor control for field inspections. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 52(3), 1768–1777. https://doi.org/10.1109/TSMC.2020.3034968.

12. Strbac, B., Cavar, I., & Jakus, D. (2022). Quadrotor model for energy consumption analysis. *Energies, 15(19)*, 7136. https://doi.org/10.3390/en15197136.

13. Idrissi, M., Salami, M., & Annaz, F. (2022). A review of quadrotor unmanned aerial vehicles: Applications, architectural design and control algorithms. *Journal of Intelligent & Robotic Systems, 104(1),* 22. https://doi.org/10.1007/s10846-021-01527-7.

14. Melo, A. G., Andrade, F. A. A., Guedes, I. P., Carvalho, G. F. C., Zachi, A. R. L., & Pinto, M. F. (2022). Fuzzy gain-scheduling PID for UAV position and altitude controllers. *Sensors, 22(6*), 2173. https://doi.org/10.3390/s22062173.

15. Nordeen, A., Mohd Basri, M. A., & Mohamed, Z. (2023). Real-time implementation of an adaptive PID controller for the quadrotor MAV embedded flight control system. *Aerospace*, 10(1), 59. https://doi.org/10.3390/aerospace10010059.

16. Shen, S., Xu, J., & Xia, Q. (2022). A fuzzy backstepping attitude control based on an extended state observer for a tilt-rotor UAV. *Aerospace, 9(11),* 724. https://doi.org/10.3390/aerospace9110724.

Дата першого надходження статті до видання: 19.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.01.2026

UDC 629.7.05:681.513:004.89

Oleh Sereda

PhD Student of the Department of Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: seredaolegv@gmail.com. **ORCID**: https://orcid.org/0000-0003-2270-0385
Google Scholar: https://scholar.google.com/citations?hl=ru&user=eP1b49cAAAAJ

RECURSIVE DIGITAL FUZZY CONTROLLER WITH FREQUENCY-PARAMETER ADAPTATION IN THE OUTER ROLL STABILIZATION LOOP OF A QUADCOPTER

This paper presents a modified recursive digital fuzzy controller for the outer roll stabilization loop of a quadcopter. In contrast to the conventional recursive digital controller, the proposed approach provides adaptive adjustment of the dynamic response through fuzzy tuning of the equivalent frequency parameter w_n. At each sampling instant, the current value of w_n is generated by a Sugeno-0 fuzzy inference module using the normalized roll-angle error and the filtered error increment as input variables. The obtained value is further employed for the parametric synthesis of the numerator coefficients of the digital controller and for damping correction based on Ackermann's method, while the denominator of the recursive control law remains unchanged. This structure ensures adaptive variation of response speed and rigidity without increasing the structural complexity of the control loop. The proposed system was modeled in Python and compared with the approaches described in [1] and [2]. The comparative results confirm the efficiency of the developed controller and demonstrate its applicability to quadcopter roll stabilization problems.

***Keywords**: quadcopter; outer loop; roll stabilization; digital controller; fuzzy logic; Sugeno-0; adaptation of w_n; Ackermann's method; energy efficiency.*

Fig.: 5. Table: 4. References: 16.

Середа О. В. Фаззі-регулятор у зовнішньому контурі стабілізації крену квадрокоптера. *Технічні науки та технології*, 2026. № 1(43). С. 332-343. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-332-343.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-344-354
UDC 621.314.1

Vasyl Tarasiuk[1], Oleksiy Gorodny[2]

[1]PhD Student of the Department of Electrical Engineering and Information and Measurement Technologies, Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: vasyltarasiuk.ua@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0003-5310-9202

[2]PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics, Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: aleksey.gorodny@gmail.com. **ORCID**: https://orcid.org/0000-0001-5303-9564

INCREASING ENERGY EFFICIENCY OF QUASI-RESONANT CONVERTERS UNDER DYNAMIC LOADS BY MEANS OF ADAPTIVE AI CONTROL AND SIMULATION

The article investigates the problem of increasing energy efficiency and ensuring the stability of quasi-resonant switched-mode converters (QRC) under dynamically changing load conditions. The operating circuit and loss calculation formulas have been selected. A comparative analysis of modern simulation environments was performed to improve real-time control algorithms. The feasibility of integrating artificial intelligence tools, particularly reinforcement learning (DRL) and large language models (LLMs), is analyzed.

Keywords: *quasi-resonant converter; zero-current switching; adaptive control; hardware-in-the-loop simulation; artificial intelligence; reinforcement learning; large language models; energy efficiency.*
Figures: 2. Tables: 6. References: 19.

Relevance of the research. Modern switched-mode voltage converters require high energy efficiency and adaptive control under dynamically changing loads while minimizing electromagnetic interference. QRC with soft-switching modes significantly reduce switching losses, allowing for increased PCE and raised switching frequency. For example, switching power switches at zero current allows for significantly minimizing switching losses. In combination with ultrafast GaN/SiC transistors [1], which have switching periods measured in nanoseconds, this enables operation at high frequencies. High frequency and dynamically changing operating modes create new challenges. Rapid changes in operating modes can generate high-frequency oscillations and require fast and adaptive control. This problem can be addressed by means of adaptive control using machine learning and modern large language models (LLM) [2].

Target setting. The key problem is ensuring the stable and energy-efficient operation of QRCs under conditions of dynamically changing loads. The quasi-resonant operating mode significantly reduces the switching losses of the power switch. However, when operating with dynamically changing loads, electromagnetic interference may arise, energy losses may increase, and system stability may decrease. Modern GaN/SiC transistors with switching times measured in nanoseconds allow for operation at ultra-high frequencies. Classical control methods may reduce energy efficiency during dynamic load changes. Therefore, flexible control methods are necessary - for example, adaptive control using machine learning and modern LLMs.

Actual scientific research and issues analysis. Recent publications indicate that LLMs and other AI methods are already being applied in power electronics. In one publication, GPT-4 with a Retrieval-Augmented Generation (RAG) mechanism [3] was able to automatically select a DC-DC converter topology, calculate parameters, and generate code for functional blocks (e.g., an MPPT block in Simulink) [4]. Two GPT agent copies were configured: one selected the optimal circuit, and the other selected components and program code according to given technical specifications. The results showed that ChatGPT is capable of independently constructing control algorithms and explaining its decisions based on technical data.

In the publication by Bernadić, A., author built an agent based on LLaMA 3 in the Pandapower environment for grid control and found that integrating LLMs significantly improves the efficiency and reliability of the power system operation. The authors note the potential of language models for

© V. Tarasiuk, O. Gorodny, 2026

grid stabilization. Another example is the specialized model PE-GPT, an LLM trained on power electronics, which outperformed human experts by 22.2% in decision accuracy and standard GPT-4 by 35.6%. These experiments testify that LLMs already act as "intelligent assistants" in designing converters, optimizing parameters, and formulating control algorithms [5].

Existing publications by foreign and Ukrainian authors lack a detailed comparison of available software environments and the language models available for integration with them. However, there is a need for such a comparison, as there are dozens of different software environments and language models. Most of these solutions are paid, and it is important to select the software environment, machine learning package, and language model in accordance with the set goal.

The aim of the research is a comprehensive study of integrating modern AI solutions, namely large language models and deep reinforcement learning, into control systems for switched-mode converters to enhance energy efficiency and eliminate electromagnetic interference. The objective is to provide a detailed description and comparison of various language models, assessing their suitability for controlling QRCs. Available software environments and their integration with language models and machine learning are examined. As a result of the research, the optimal solution for this task is selected, and a plan for further research is formulated.

The statement of basic materials.

Figure 1 shows the model of a parallel QRC-ZCS, and Figure 2(a) shows the timing diagrams of its operation in the case of operation without diode VD3. Analysis of the circuit operation allows distinguishing five characteristic switching intervals of the QRC-ZCS, which include [6]:

1) VT turn-on interval (t0-t1): The beginning of the cycle when the power switch starts conducting current.

2) VT on-state interval (t1-t2): The main conduction phase when current flows directly through the transistor channel.

3) VT on-state interval via diode (t2-t3): The stage of the resonant process when the current changes direction and closes through the reverse (anti-parallel) diode D0.

4) VT turn-off interval (t3-t4): The process of turning off the transistor when the current passes through zero (ZCS).

5) VT off-state interval (t4-t0): A pause in the operation of the power switch, when the energy stored in the main inductor L is transferred to the load [6].

For this model, these physical stages correspond to the following time ranges on the oscillograms: 1-2; 2-4; 4-6; 6-7; 7-1. These timing diagrams demonstrate that parasitic high-frequency oscillations, caused by resonant phenomena between circuit elements and parasitic capacitances, do not have time to cease before the arrival of the next control pulse.

The presence of undamped oscillations in the fifth switching interval is a problem requiring a solution. This leads to additional losses in the converter due to the dissipation of parasitic oscillation energy on the active resistances of its elements. It is important that the output voltage regulation in the QRC-ZCS is carried out by means of pulse-frequency modulation (PFM). Therefore, if this converter operates in modes where the duty cycle exceeds the threshold value of 0.2, there is a high probability that the power switch will start opening at a moment when the current in the circuit is not equal to zero. This leads to a violation of soft-switching conditions and a sharp increase in energy losses in the power switch. An effective solution to this problem is modifying the circuit and connecting an additional diode between the drain of the power switch and the load. In such a circuit, parasitic oscillations will decrease practically to zero.

Timing diagrams of the operation of such a converter with the introduced diode are shown in Fig. 2(b). In this figure, the process dynamics have changed, and the five characteristic switching intervals of the QRC-ZCS described above now correspond to new time ranges: 1-3; 3-5; 5-7; 7-8; 8-1 [6].

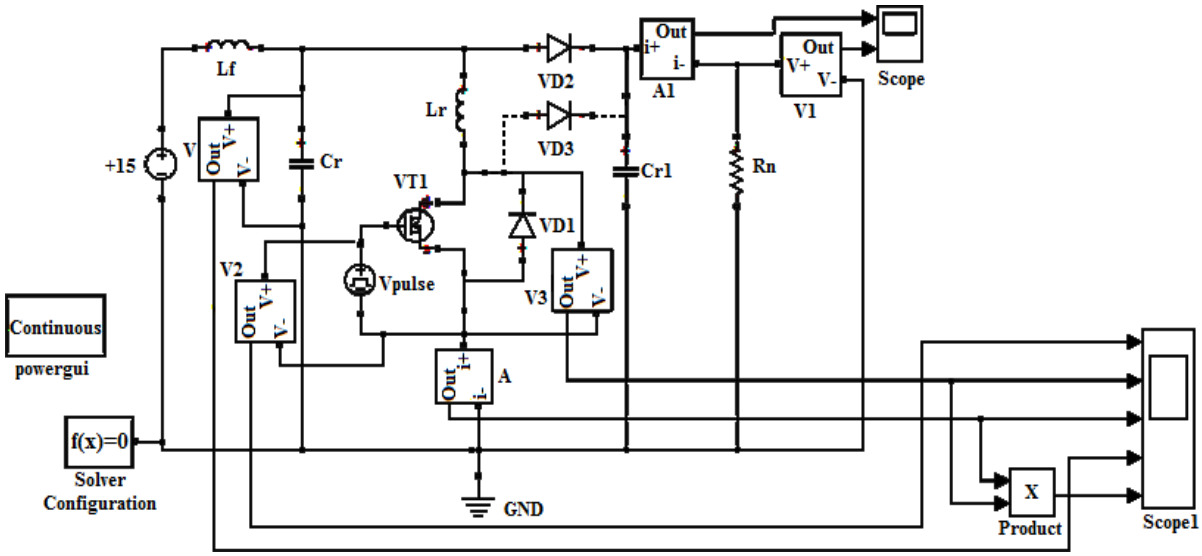


Fig. 1. Model of a parallel QRC-ZCS

Source: [6].

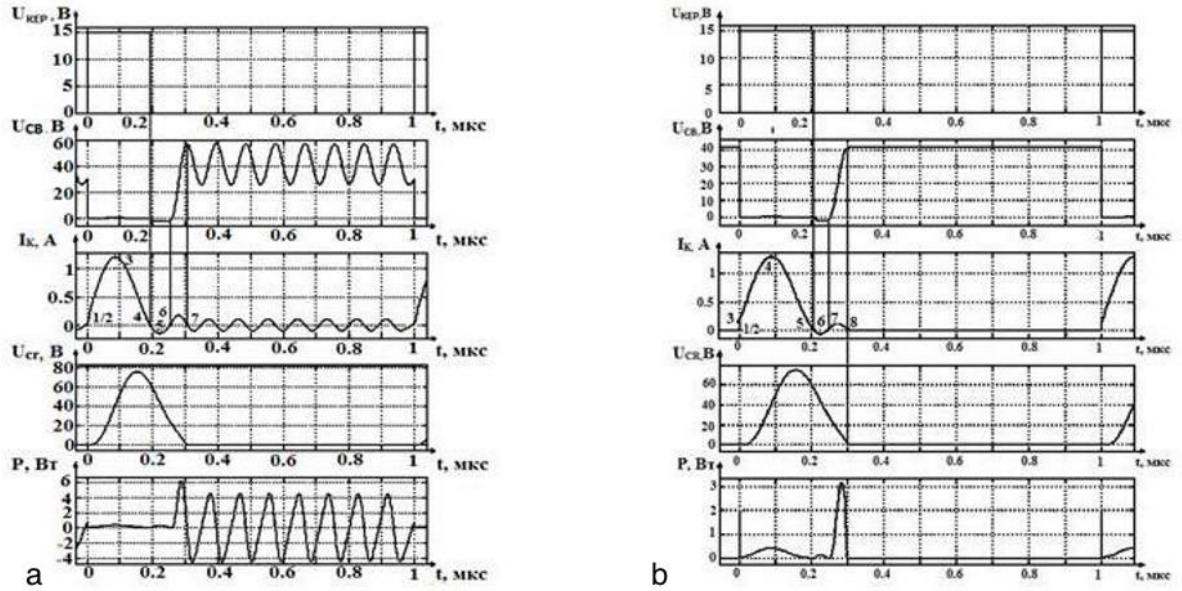


Fig. 2(a) - shows the timing diagrams of the QRC-ZCS operation without diode VD3. Figure 2(b) - illustrates the operation of the improved converter with the additional diode VD3.

Source: [6].

For the quantitative assessment of energy efficiency, a boost converter model is used. The calculation of total losses in power switches for both the QRC-ZCS and the traditional PWM converter is carried out by summing the losses in each separate switching interval. At the same time, losses in the last interval can be neglected, since the switch is in the closed state, and the leakage current is close to zero. The loss calculation is presented in Formula 1.

$$P_n = \frac{1}{t_n - t_{n-1}} \int_{t_{n-1}}^{t_n} u_{ds}(t) \cdot i_{VT}(t) dt \quad (1)$$

The power dissipation at each stage is determined as the integral of the product of the instantaneous values of the drain voltage Uds - drain-source voltage - and the channel current Ivt - current through the power switch over the duration of the switching interval n. An even more accurate criterion is the estimation of the total energy losses in the power switch per cycle.

This indicator is calculated by integrating the instantaneous power function over time for each interval. The loss calculation is presented in Formula 2.

$$P_n = \frac{1}{t_n - t_{n-1}} \int_{t_{n-1}}^{t_n} u_{ds}(t) i_{VT}(t) dt \quad (2)$$

Having defined the mathematical formulas for calculating energy losses, the next step is to address the challenge of increasing power density and enhancing energy efficiency across various load levels of the power switches. PWM converters suffer from switching losses caused by the simultaneous presence of high voltage and current on the power switch during switching transients. These losses tend to increase as the frequency rises. To address this issue, it is possible to combine existing control methods with novel control approaches based on AI and machine learning. This approach can improve the energy efficiency of voltage converters under dynamically changing loads.

Selecting the appropriate simulation platform is crucial for obtaining reliable and reproducible results, especially when working with high-frequency and nonlinear systems such as QRCs. Software environments capable of simulating an experimental model serve as a vital tool for implementing AI-based adaptive control. Such environments enable topology verification, control algorithm development, and parameter analysis for the subsequent creation of physical prototypes.

The MATLAB/Simulink platform by MathWorks is a popular tool for modeling and control system development. For power electronics modeling, the Simscape Electrical software environment is used. It allows for the creation of physical models of electrical, mechanical, thermal, and other systems. For advanced modeling of DC-DC converters, the Simscape Electrical Specialized Power Systems toolbox is often utilized, ensuring high accuracy [7].

The MATLAB platform features built-in toolboxes such as the Deep Learning Toolbox and Reinforcement Learning Toolbox. Adaptive control of QRCs is a task that MATLAB can execute using machine learning. The switched-mode converter model in Simulink/Simscape can be used as an environment for training a DRL agent, which learns to control the switch energy-efficiently, replacing traditional PID regulators or complex fuzzy logic systems [8].

A drawback of such a system is the simulation speed. Due to the use of detailed models and differential equations (e.g., ode45, ode15s), modeling switching circuits with high frequencies and parasitic capacitances may require significant computational power. MATLAB version R2024a features an improved Reinforcement Learning Toolbox supporting DQN, PPO, SAC, and DDPG algorithms. These agents can learn to control QRCs within the Simulink environment [9].

MATLAB has integration with Python, interaction with Large Language Models (LLMs) becomes possible. LLMs can be used to automatically generate new code or improve existing code and scripts for configuring complex simulations in Simulink, which can accelerate research.

The PLECS software environment by Plexim GmbH [10] is a software package developed for power electronics simulation. Its key advantage is speed. Unlike Simscape, which uses complex nonlinear semiconductor models, PLECS uses idealized switch models that neglect parasitic parameters (less than 10 ns). This provides a significant advantage in simulation speed specifically for switched-mode converters. Losses are described analytically, allowing for a quick estimation of efficiency. This solution is advantageous during the initial stages of research.

The PLECS software environment exists in two versions. PLECS Blockset integrates directly into the Simulink environment. This allows modeling the control system in Simulink and the power circuit in PLECS. Moving the entire control system from Simulink into the PLECS block can increase simulation speed. The PLECS Standalone version is an independent environment that does not require MATLAB/Simulink and provides even higher speed.

Integration with AI is limited. PLECS does not have its own built-in AI tools. However, it can interact with Python scripts, allowing for the import and execution of neural networks. This integration is implemented through the simulation architecture: a DRL agent implemented in Python calls the PLECS simulation via an API script or through third-party tools such as PyPLECS [10].

A disadvantage of this software environment is lower computational accuracy compared to MATLAB. Due to object idealization, speed increases, but result accuracy decreases.

The OpenModelica software environment [11] is a free, open-source platform based on the object-oriented, declarative language Modelica. In Modelica, instead of defining signal flows, the user describes the system through its physical components and mathematical equations. This allows for easy description of complex and composite systems. As open-source software, it is free and offers complete transparency - the user can see the equations underlying each block. This solution is also well-suited for developing control algorithms and optimization.

The Modelica software environment can be integrated with LLMs, where LLMs generate and modify Modelica code. This makes Modelica a promising platform for AI-assisted workflows, where the user and AI collaborate on the textual description of the model [11].

Table 1 – Comparison of simulation software environment characteristics

Parameter	MATLAB/Simscape R2025b	PLECS 4.8	OpenModelica 1.25.5
Modeling Paradigm	Multi-domain physical modeling. Based on solving nonlinear differential equations (ODE).	Modeling based on idealized switches. Avoids solving nonlinear ODEs by treating switches as ideal components with linear states (on/off).	Declarative modeling. Based on solving differential-algebraic equations (DAE).
Parasitic Parameter Handling	High accuracy. Detailed modeling of nonlinearities, thermal parameters, SPICE model import.	Idealized. Neglects parasitic parameters with small time constants (< 10 ns).	High accuracy (Determined by the level of detail in DAE equations).
Speed for QRC Systems	Low/Medium (Computationally complex due to solving nonlinear ODEs).	Very High (Optimized for switching circuits, 10-20 times faster than nonlinear models).	Medium (Depends on DAE system complexity and solver efficiency).
Integration with Machine Learning	Yes. Reinforcement Learning Toolbox (DQN, PPO, SAC, DDPG).	No. Requires additional simulation via Python API.	No. Requires additional simulation via API.
Integration with LLM	Script generation (.m).	Script generation (Python).	Highest suitability, ability to generate control code.

Source: [7-11]

If modeling in software environments confirms the working control system model, the next step is verification using a physical controller. This process is called Hardware-in-the-Loop (HIL) simulation [12]. In a HIL system, the real hardware controller is connected to a real-time simulator that acts as the power stage of the switched-mode converter. This allows for safe verification of the controller's operation in thousands of scenarios, including emergency ones, without the risk of damaging expensive equipment. Selecting the appropriate HIL platform is an important decision that affects simulation accuracy, testing throughput, and the final simulation result.

The most popular HIL simulators for power electronics are Opal-RT Technologies, Typhoon HIL, National Instruments, dSPACE, and Speedgoat. These simulators are often used for the development of modern electric vehicles and the integration of renewable energy sources.

Opal-RT specializes in high-performance real-time simulators combining powerful multicore processors (CPU) and advanced FPGAs, specifically AMD Kintex-7 and Virtex-7. For power electronics modeling, Opal-RT developed the specialized eHS simulator. This high-level simulator allows for modeling complex converters directly on the FPGA, achieving small simulation steps. Such a simulator has high performance, which is important when modeling QRCs

operating at high frequencies. Opal-RT platforms, such as OP5707XG2 or OP4512, thanks to eHS and FPGA with high timer resolution (up to 625 ps with oversampling), achieve simulation steps down to 90–145 ns. This allows modeling switching frequencies up to 500 kHz and is one of the few solutions on the market capable of modeling controller operation using high-frequency QRCs based on SiC and GaN.

The central processor is based on Intel Xeon Gold processors and is offered in two configurations: OP5707XG2-08 (P/N 429-0307): 8 cores with a clock frequency of 4.2 GHz. OP5707XG2-16 (P/N 429-0310): 16 cores with a clock frequency of 3.9 GHz.

In this case, the 8-core configuration with a higher clock frequency (4.2 GHz) is optimized for reducing latency and minimizing the time step for single-thread simulations performed primarily on the CPU. At the same time, the 16-core configuration is designed for performing parallel computations at the CPU level. This is better suited for scenarios involving the simulation of multiple independent models (e.g., power system model, multiple controllers). Such operations must be performed simultaneously on dedicated cores [12].

Simulators from Typhoon HIL [13] provide integrated solutions for power electronics. Platforms from Typhoon HIL are optimized for testing controllers (ECU) in industries such as electric vehicles, battery management systems (BMS), and solar and wind inverters.

Simulators from this company feature ultra-low latency and a very small simulation step. The current HIL606 software ensures a simulation step (timestep) down to 25 ns and PWM input resolution (GDS) up to 3.5 ns. The Typhoon Test Hub toolkit allows automating testing processes. The software also includes tools for loss analysis, thermal analysis, and digital modeling.

The entire HIL606 platform is built on a single System-on-Chip (SoC), specifically the AMD/Xilinx ZU9EG Zynq UltraScale+ MPSoC. This choice is decisive for the entire system. The Zynq UltraScale+ architecture combines a processing system (CPU) and programmable logic (FPGA). CPU: The system has 8 computing cores. FPGA: UltraScale+ programmable logic is integrated into the ZU9EG SoC.

Unlike OPAL-RT, where the Xeon CPU and Virtex-7 FPGA are separate components connected via a bus with latency measured in microseconds, HIL606 has the CPU and FPGA on a single chip.

It has a fixed configuration: Analog Inputs (AI): 32 channels, Analog Outputs (AO): 64 channels. Digital Inputs (DI): 64 channels, Digital Outputs (DO): 64 channels. ADC/DAC resolution: 16 bit, Analog I/O range: ±10 V, ADC sampling rate: Up to 1 MSPS (1 μs step). Analog output update rate (AO): Up to 200 ns, GDS Oversampling (Digital Input): 3.5 ns [13].

National Instruments (NI) offers a different approach: a modular and flexible system based on the PXI (PCI eXtensions for Instrumentation) hardware platform and VeriStand software. The advantage of NI products lies in their openness and flexibility. The PXI platform can be configured by the user with various I/O boards and FPGAs [14].

VeriStand software for HIL testing can import models from various environments, including Simulink. It can also integrate third-party simulators; for example, Opal-RT offers its eHS solver as an add-on running on NI PXI FPGA boards. This gives users the ability to apply diverse configurations via LabVIEW, C/C++, or Python. This opens wide possibilities for integrating LLMs, which can automatically generate Python scripts for VeriStand, creating flexible, adaptive, and comprehensive validation testing cycles.

The foundation of the platform is PXIe-1095.20. Its key characteristics: Bus: PCI Express Gen 3 technology. Bandwidth: 24 GB/s throughput. CPU: 11th Gen Intel Core processors, e.g., PXIe-8842 with 6-core i5-11500HE. OS: Supports Windows and NI Linux Real-Time.

NI offers two main approaches to processing on FPGA and I/O. Approach 1: R-Series (Integrated I/O on module). This approach is represented by the PXIe-7868 module. FPGA: AMD Kintex-7 325T. Integrated I/O (per 1 board): 6 analog inputs. 18 analog outputs. 48 bidirectional digital channels (3.3V). Key architectural differences are presented in the following three tables for accurate comparison.

Table 2 – Comparison of central computing resources and memory

Parameter	OPAL-RT OP5707XG2-08	OPAL-RT OP5707XG2-16	Typhoon HIL HIL606	NI PXIe (Example Config)
CPU Model	Intel Xeon Gold	Intel Xeon Gold	ZU9EG (ARM Cortex-A53)	Intel Core i5-11500HE
CPU Cores	8 cores	16 cores	Up to 8 cores	6 cores
CPU Frequency	4.2 GHz	3.9 GHz	~1.5 GHz	Up to 4.6 GHz
System DRAM	32 GB	32 GB	16 MB per core	Up to 64 GB
Internal Storage	1 TB SSD	1 TB SSD	M.2 Slot	512 GB NVMe SSD

Source: [12-14].

Table 3 – Comparison of I/O subsystem specifications

Parameter	OPAL-RT OP5707XG2	Typhoon HIL HIL606	NI PXIe-7868 (1 module)
Analog Inputs (AI)	Up to 256	32	6
Analog Outputs (AO)	Up to 256	64	18
Digital I/O (DIO)	Up to 256	64 In / 64 Out	48 (bidirectional)
ADC Resolution	16 bit	16 bit	16 bit
AI Voltage Range	±20V	±10 V	±1V to ±10V

Source: [12-14].

Table 4 – Comparison of key real-time performance indicators

Parameter	OPAL-RT (with eHS)	Typhoon HIL HIL606	NI PXIe-7868 (1 module)
Min. Time Step	90 ns	200 ns	~1 µs
AO Update Rate	90 ns	200 ns	1 µs
DI Resolution	625 ps	3.5 ns	<10 ns
Bus Bandwidth	1-5 Gbit/s (SFP)	Integrated in SoC	24 GB/s

Source: [12-14].

The capability of AI to handle disturbances depends directly on the control system's sampling frequency. The utilization of modern HIL platforms and FPGA controllers ensures a calculation step in the range of 90–145 ns. This enables the control system to accurately process signals and adapt to load variations for converters operating at switching frequencies of up to 500 kHz – 1 MHz. With this speed, an AI agent can respond to disturbances within 1–3 switching periods, which is sufficient to prevent emergency conditions and loss of energy efficiency [15, 16].

The emergence of powerful LLMs opens new possibilities in designing and analyzing complex power circuits. Modern language models can be divided into two main categories, the choice between which is determined by the balance between performance and cost.

Models accessible via API: They usually demonstrate the highest speed and are better suited for use in other software environments.

1. OpenAI: The current model is GPT-5.2, providing high performance in code generation, text analysis, and powerful multimodal capabilities [15, 16].

2. Anthropic: Claude 3.5 Sonnet [17] offers differentiated models. The current model is Claude 4.1 Opus. It is positioned as a model with the best capabilities for complex logical reasoning. Currently, Sonnet 4.5 is considered the leading model for practical coding tasks and agent workflows.

3. Google: Gemini 3.0 Pro [18] is well-suited for analyzing large volumes of data, such as hundreds of PDF pages, long videos, or large amounts of code.

Open-Source models are available on the market. These models, although slightly inferior in general performance, can be freely downloaded, modified, and used directly on a local computer without using an API. This can be important for security-sensitive developments.

An example of this model is Meta Llama 3 [19], which has high accuracy and powerful logical capabilities. CodeLlama is a family of models specifically trained on code, making them a better choice for code generation and analysis tasks. Mixtral 8x22B is more productive com-

pared to Llama 3 70B, has higher operating speed, and lower computational resource requirements. The current version from Meta is Llama 4, which includes the Llama 4 Scout and Llama 4 Maverick models. Also available are Mistral AI models including Mistral Large and Mistral Medium 1.1. They are created for specialized code generation tasks. The SOTA open-source model is DeepSeek-Coder-V2, trained on 6 trillion tokens, 87% of which is program code.

For tasks such as modeling the operation of switched-mode converters, AI capabilities beyond simple text generation are required. An AI capable of analyzing large volumes of data and generating responses at high speed is needed. Testing on HIL platforms generates huge volumes of files that AI must analyze and generate a response for. Here, it is necessary to choose an AI capable of analyzing as much data as possible. Gemini 3.0 Pro can use up to 2 million tokens, Claude 4.5 Sonnet up to 200k tokens, and GPT-5.2 up to 128k tokens. However, the largest available token volume is offered by the open-source model Meta Llama 4 Scout – 10 million tokens, allowing for the analysis of the largest arrays of HIL test logs in a single iteration.

Table 5 – Comparative characteristics of leading LLMs

Model	Developer	Type	Max. Tokens	Key Advantage
Claude Sonnet 4.5	Anthropic	API	Up to 200k	Code generation for practical tasks, coding.
GPT-5	OpenAI	API	Up to 200k	Versatility: Powerful agent behavior, coding, and multimodality.
Gemini 3.0 Pro	Google	API	Up to 1M	Analysis of large datasets.
Llama 4 Scout	Meta	Open-Source	Up to 10M	Data analysis: Largest available token count for analyzing large volumes of data.
DeepSeek-Coder-V2	DeepSeek-AI	Open-Source	Up to 64k	Code specialization: Trained on 87% code, best local coder.

Source: [16-19].

Table 6 – Comparative characteristics of leading LLMs (Modalities and Pricing per 1M tokens)

Model	Modality (Input)	Input Price ($/1M)	Output Price ($/1M)
GPT-5 Pro	Text, Image, Audio, Video	$15.00	$120.00
GPT-5	Text, Image, Audio, Video	$1.25	$10.00
Gemini 3.0 Pro	Text, Image, Audio, Video	$1.25	$10.00
Claude Sonnet 4.5	Text, Image	$3.00	$15.00
Llama 4 (Scout/Mav.)	Text, Image	Self-hosted	Self-hosted
Mistral Large 2	Text only (image via Pixtral)	$2.00	$6.00 - $9.00
DeepSeek-Coder-V2	Text/Code only	Self-hosted	Self-hosted

Source: Table developed by the authors, data taken from sources [16-19].

Based on the conducted analysis of available solutions and the comparison of their efficiency, a plan for modeling the QRC circuit using AI and implementing adaptive control was developed.

It is necessary to create a QRC model using MATLAB with the built-in Reinforcement Learning Toolbox. It is required to develop and programmatically integrate an adaptive DRL controller [2]. Implement DRL agent training in the created Simscape model environment, setting the task to minimize switching losses during operation with dynamically changing power switch operating modes. A key strategy is using data-driven learning: the agent is first trained on a large static dataset generated in offline simulation, and only then deployed for validation on the HIL platform. It is necessary to automate testing, for which Gemini 3.0 Pro should be used to generate operation scripts. The main task is to combine stable operation and loss minimization under dynamically changing loads.

Conclusions. It has been investigated that increasing the energy efficiency and stability of QRCs under dynamically changing loads is achieved by combining hardware and software solutions. It was determined that for the implementation of adaptive control, the optimal combination is the MATLAB/Simulink environment for training reinforcement learning (DRL) agents and HIL simulators based on FPGA (Opal-RT) for subsequent simulation and investigation of timing characteristics in the nanosecond range. The integration of modern LLMs into the development process allows for the automation of result analysis and code optimization, making the proposed comprehensive approach an effective tool for increasing the energy efficiency of power switches when working with variable loads. Future research will focus on the practical implementation and development of models and control algorithms. The development and training of a DRL agent for adaptive control of the power switch are planned.

References

1. Jeng, S., Peng, M., Hsu, C., Chieng, W., & Shu, J. (2012). Quasi-Resonant flyback DC/DC converter using gan power transistors. *World Electric Vehicle Journal*, *5*(2), 567–573. https://doi.org/10.3390/wevj5020567.

2. Tarasiuk, V., & Gorodny, O. (2025). Adaptive control to enhance energy efficiency in quasi-resonant switched-mode converters under dynamic loads. *Technical Sciences and Technologies*, (3 (41)), 419–431. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-419-431.

3. Tural, B., Örpek, Z., & Destan, Z. (2024). Retrieval-augmented generation (RAG) and LLM integration. In *Proceedings of the 2024 8th International Symposium on Innovative Approaches in Smart Technologies (ISAS)* (pp. 1–5). https://doi.org/10.1109/ISAS64331.2024.10845308.

4. Baumann, A., & Eberhard, P. (2025). Experiments with large language models on retrieval-augmented generation for closed-source simulation software. *arXiv*. https://arxiv.org/abs/2502.03916.

5. Bernadić, A. (2025). Leveraging large language models for analysis and control of power transmission networks: Case studies with the llama3 LLM model and pandapower. *B&H Electrical Engineering*. https://doi.org/10.2478/bhee-2025-0018.

6. Denisov, Y. A., Gorodny, A. N., Gordienko, V. V., Boyko, S. N., & Stepenko, S. A. (2016). Enerhetychni pokaznyky paralelnoho impulsnoho kvazirezonansnoho peretvoriuvacha z rozshyrenym diapazonom rehuliuvannia dlia dzherel zhyvlennia radioelektronnoi aparatury [Energy indicators of the parallel pulse quasi-resonant converter with extended control range for radioelectronic apparatus power supplies]. *Elektronika ta zviazok – Electronics and Communications*, 21(5), 50–56. https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/b019ab93-3964-43f3-9a6d-70e8115d2272/content.

7. Sybille, G., & Le-Huy, H. (2000). Digital simulation of power systems and power electronics using the MATLAB/Simulink Power System Blockset. In *Proceedings of the 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*. IEEE. https://doi.org/10.1109/PESW.2000.847358.

8. Lynch, S. (2025). The deep learning toolbox. In *Dynamical systems with applications using MATLAB®* (pp. 501–521). Birkhäuser. https://doi.org/10.1007/978-3-031-89067-3_24.

9. Ibrahim, M. (2024). *A comparative study of SAC and PPO algorithms in reservoir water level control simulation*. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14519.33442.

10. Das, S. (2020). *Modeling and simulation of mechatronic systems using simscape*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-79653-1.

11. Wan, H., Lu, X., Chen, Y., Devaprasad, K., & Hinkle, L. (2025). Automating Modelica module generation using large language models: A case study on Building Control Description Language. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2509.14623.

12. Nicola, M., Nicola, C.-I., Ionete, C., & Roman, M. (2025, June 11–13). HIL simulation of load frequency control for two-area power system using RT-OPAL. In *Proceedings of the 2025 7th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)*. IEEE. https://doi.org/10.1109/GPECOM65896.2025.11061972.

13. Sudi, M., Padmanaban, S., & Ozsoy, E. (2025, April 7–10). Typhoon HIL modeling and control of grid-connected hybrid renewable energy system. In *Proceedings of the 2025 IEEE International Systems Conference (SysCon)*. IEEE. https://doi.org/10.1109/SysCon64521.2025.11014785.

14. Sayin, E., Jambak, A. I., & Bayezit, İ. (2024, May). An implementation of hardware-in-the-loop system for accurate vessel heading control. In *Proceedings of the Global Maritime Congress (GMC'24)*, Istanbul, Türkiye. https://www.researchgate.net/publication/381127538_An_Implementation_of_Hardware-in-the-Loop_System_for_Accurate_Vessel_Heading_Control.

15. Lin, F., Li, X., Lei, W., Rodriguez-Andina, J. J., Guerrero, J. M., & Wen, C. (2025). PE-GPT: A new paradigm for power electronics design. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 72*(4), 3778–3791. https://doi.org/10.1109/TIE.2024.3454408.

16. OpenAI. (2025, December 11). *Introducing GPT-5.2*. https://openai.com/index/introducing-gpt-5-2/.

17. Anthropic. (2025, September 29). *Introducing Claude Sonnet 4.5*. https://www.anthropic.com/news/introducing-claude-sonnet-4-5.

18. Google DeepMind. (n.d.). *Gemini 3 Pro*. https://deepmind.google/models/gemini-3-pro.

19. Meta. (n.d.). *Llama 4*. https://llama.meta.com.

Список використаних джерел

1. Jeng, S., Peng, M., Hsu, C., Chieng, W., & Shu, J. (2012). Quasi-Resonant flyback DC/DC converter using gan power transistors. *World Electric Vehicle Journal*, *5*(2), 567–573. https://doi.org/10.3390/wevj5020567.

2. Tarasiuk, V., & Gorodny, O. (2025). Adaptive control to enhance energy efficiency in quasi-resonant switched-mode converters under dynamic loads. *Technical Sciences and Technologies*, (3 (41)), 419–431. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-419-431.

3. Tural, B., Örpek, Z., & Destan, Z. (2024). Retrieval-augmented generation (RAG) and LLM integration. In *Proceedings of the 2024 8th International Symposium on Innovative Approaches in Smart Technologies (ISAS)* (pp. 1–5). https://doi.org/10.1109/ISAS64331.2024.10845308.

4. Baumann, A., & Eberhard, P. (2025). Experiments with large language models on retrieval-augmented generation for closed-source simulation software. *arXiv*. https://arxiv.org/abs/2502.03916.

5. Bernadić, A. (2025). Leveraging large language models for analysis and control of power transmission networks: Case studies with the llama3 LLM model and pandapower. *B&H Electrical Engineering*. https://doi.org/10.2478/bhee-2025-0018.

6. Денисов, Ю. О., Городній, О. М., Гордієнко, В. В., Бойко, С. М., & Степенко, С. А. (2016). Енергетичні показники паралельного імпульсного квазірезонансного перетворювача з розширеним діапазоном регулювання для джерел живлення радіоелектронної апаратури. *Електроніка та зв'язок, 21*(5), 50–56. https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/b019ab93-3964-43f3-9a6d-70e8115d2272/content.

7. Sybille, G., & Le-Huy, H. (2000). Digital simulation of power systems and power electronics using the MATLAB/Simulink Power System Blockset. In *Proceedings of the 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*. IEEE. https://doi.org/10.1109/PESW.2000.847358.

8. Lynch, S. (2025). The deep learning toolbox. In *Dynamical systems with applications using MATLAB®* (pp. 501–521). Birkhäuser. https://doi.org/10.1007/978-3-031-89067-3_24.

9. Ibrahim, M. (2024). *A comparative study of SAC and PPO algorithms in reservoir water level control simulation*. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14519.33442.

10. Das, S. (2020). *Modeling and simulation of mechatronic systems using simscape*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-79653-1.

11. Wan, H., Lu, X., Chen, Y., Devaprasad, K., & Hinkle, L. (2025). Automating Modelica module generation using large language models: A case study on Building Control Description Language. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2509.14623.

12. Nicola, M., Nicola, C.-I., Ionete, C., & Roman, M. (2025, June 11–13). HIL simulation of load frequency control for two-area power system using RT-OPAL. In *Proceedings of the 2025 7th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)*. IEEE. https://doi.org/10.1109/GPECOM65896.2025.11061972.

13. Sudi, M., Padmanaban, S., & Ozsoy, E. (2025, April 7–10). Typhoon HIL modeling and control of grid-connected hybrid renewable energy system. In *Proceedings of the 2025 IEEE International Systems Conference (SysCon)*. IEEE. https://doi.org/10.1109/SysCon64521.2025.11014785.

14. Sayin, E., Jambak, A. I., & Bayezit, İ. (2024, May). An implementation of hardware-in-the-loop system for accurate vessel heading control. In *Proceedings of the Global Maritime Congress (GMC'24)*, Istanbul, Türkiye. https://www.researchgate.net/publication/381127538_An_Implementation_of_Hardware-in-the-Loop_System_for_Accurate_Vessel_Heading_Control.

15. Lin, F., Li, X., Lei, W., Rodriguez-Andina, J. J., Guerrero, J. M., & Wen, C. (2025). PE-GPT: A new paradigm for power electronics design. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 72*(4), 3778–3791. https://doi.org/10.1109/TIE.2024.3454408.

16. OpenAI. (2025, December 11). *Introducing GPT-5.2*. https://openai.com/index/introducing-gpt-5-2/.

17. Anthropic. (2025, September 29). *Introducing Claude Sonnet 4.5*. https://www.anthropic.com/news/introducing-claude-sonnet-4-5.

18. Google DeepMind. (n.d.). *Gemini 3 Pro*. https://deepmind.google/models/gemini-3-pro.

19. Meta. (n.d.). *Llama 4*. https://llama.meta.com.

Дата першого надходження статті до видання: 11.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 29.12.2025

УДК 621.314.1

Василь Анатолійович Тарасюк[1], Олексій Миколайович Городній[2]

[1]аспірант кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій,
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: vasyltarasiuk.ua@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0003-5310-9202

[2]кандидат технічних наук, доцент кафедри електроніки, автоматики, робототехніки і мехатроніки,
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: aleksey.gorodny@gmail.com. **ORCID**: https://orcid.org/0000-0001-5303-9564

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ КВАЗІРЕЗОНАНСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЗА УМОВ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ЗАСОБАМИ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА МОДЕЛЮВАННЯ

У статті розглянута проблема підвищення енергоефективності сучасних систем електроживлення, де ключову роль відіграють квазірезонансні імпульсні перетворювачі (КРІП), здатні мінімізувати комутаційні втрати завдяки режимам м'якої комутації. Актуальність теми підсилюється переходом на сучасні швидкісні транзистори, що дозволяє працювати на надвисоких частотах та потребує покращеного керування. Наведено математичні залежності для розрахунку миттєвої та інтегральної потужності втрат, що дозволяє кількісно оцінити енергетичну ефективність силового ключа. На основі аналізу часових діаграм виявлено, що на п'ятому інтервалі комутації виникають незатухаючі коливання, які порушують умови перемикання при нульовому струмі. Метою дослідження є розробка комплексної методики підвищення енергоефективності КРІП шляхом впровадження адаптивного керування з використанням глибокого навчання з підкріпленням (DRL) і великих мовних моделей (LLM). У статті систематизовано та порівняно сучасні програмні середовища симуляції (MATLAB/Simulink, PLECS, OpenModelica) за критеріями точності та швидкодії. Виконано аналіз апаратних HIL платформ, порівняно їх здатність реалізувати наносекундні процеси перемикання. Особливу увагу приділено порівняльному аналізу можливостей провідних мовних моделей щодо автоматизації генерації керуючого коду та обробки великого об'єму даних результатів роботи. Запропоновано комплексне рішення: інтегрувати середовище MATLAB та великі мовні моделі для покращення стабільності та енергоефективності роботи силових ключів у реальному часі. Поставлено цілі на майбутні дослідження щодо практичної реалізації запропонованих алгоритмів на фізичних контролерах.

Ключові слова: *квазірезонансний перетворювач; комутація при нульовому струмі; адаптивне керування; напівнатурне моделювання; штучний інтелект; навчання з підкріпленням; великі мовні моделі; енергоефективність.*

Рис.: 3. Табл.: 6. Бібл.: 19.

Tarasiuk V., Gorodny O. (2026) Increasing energy efficiency of quasi-resonant converters under dynamic loads by means of adaptive AI control and simulation. *Technical sciences and technologies*, (1(43)), 344-354. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-344-354.

РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-355-381
УДК 620.92

Віталій Іванович Зацерковний[1], Олександр Миколайович Васильєв[2]

[1] доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри геоінформатики
Київський національний університет імені Тараса Шевченка ННІ «Інститут геології» (Київ, Україна)
E-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0003-5187-6125. **ScopusID:** 57200165109

[2]аспірант кафедри геоінформатики 2 року навчання, спеціальність 193 – Геодезія та землеустрій
Київський національний університет імені Тараса Шевченка ННІ «Інститут геології» (Київ, Україна)
E-mail: vasilyeva455@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0009-2177-7859

ОЦІНКА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В УКРАЇНІ

Використання викопного палива супроводжується зростанням викидів діоксиду вуглецю (CO_2), посиленням кліматичних змін та енергетичними ризиками. У цих умовах розвиток відновлюваних джерел енергії та водневої енергетики розглядається як один із ключових напрямів декарбонізації та підвищення стійкості енергосистем. Водень може виконувати роль універсального енергоносія й засобу довгострокового накопичення енергії. Для України впровадження водневих технологій пов'язане з перспективами модернізації енергетичної інфраструктури, розширення інвестиційних можливостей та інтеграції до європейського енергетичного простору.

Ключові слова: *викопне паливо; відновлювальні джерела енергії; воднева енергетика; водень; вуглецева нейтральність; енергетична ефективність.*
Рис.: 17. Табл.: 17. Бібл.: 34.

Актуальність теми дослідження. Сучасний етап розвитку світової енергетики характеризується необхідністю глибоких структурних трансформацій, зумовлених посиленням кліматичних та екологічних викликів, зростанням глобального попиту на енергетичні ресурси та підвищенням ризиків енергетичної залежності [1; 3]. У цих умовах ключовим інструментом досягнення кліматичної нейтральності, зменшення викидів парникових газів і зміцнення енергетичної безпеки держав виступає декарбонізація енергетичного сектору шляхом диверсифікації джерел енергії та зниження залежності від викопних палив [5]. Це закріплено у глобальних кліматичних угодах та національних стратегіях розвитку, визначено зменшення антропогенних викидів парникових газів і перехід до низьковуглецевих економік. Досягти цих цілей можна за умови системного впровадження ВДЕ та розвитку водневої енергетики.

Однією з ключових глобальних екологічних проблем сучасності є забруднення атмосферного повітря (АП), що супроводжує індустріальний розвиток суспільства [1] і яке безпосередньо впливає на здоров'я людей і тварин, стан довкілля та кліматичні процеси на планеті. Особливої актуальності ця проблема набула у XX–XXI століттях у зв'язку зі зростанням енергоспоживання, урбанізації та інтенсифікації транспортних систем.

Основною причиною забруднення повітря є антропогенна діяльність людини, зокрема використання викопного палива для задоволення енергетичних і транспортних потреб. Головним чинником забруднення повітря є спалювання викопного палива – вугілля, нафти та природного газу, які широко застосовуються для виробництва електроенергії, опалення житлових і промислових приміщень, а також для забезпечення роботи транспорту [2].

У процесі згоряння викопного палива в атмосферу викидаються значні обсяги забруднюючих шкідливих речовин, зокрема вуглекислого газу (CO_2), діоксиду сірки (SO_2), оксидів азоту (NO_2 та NO_x), а також твердих завислих частинок (PM_{10} і $PM_{2.5}$). Ці компоненти характеризуються високою токсичністю та здатністю до тривалого перебування в атмосфері, що зумовлює їхній негативний вплив на екосистеми та живих організмів.

Викиди CO_2 є одним із ключових чинників посилення парникового ефекту, що призводить до глобальних кліматичних змін [3]. Підвищення середньої температури повітря спричиняє порушення кліматичних режимів, танення полярних льодовиків, зростання рівня Світового океану та збільшення частоти екстремальних погодних явищ [34]. Діоксид сірки та оксиди азоту, взаємодіючи з атмосферною вологою, утворюють кислотні опади. Кислотні дощі спричиняють деградацію ґрунтів, зниження родючості сільськогосподарських угідь, ушкодження лісових екосистем і закислення поверхневих вод. Крім того, вони прискорюють корозійні процеси та руйнування об'єктів інфраструктури. Значну екологічну небезпеку становлять також тверді відходи згоряння, зокрема зола та шлаки. Їх накопичення і неналежне зберігання можуть призводити до забруднення ґрунтів і ґрунтових вод токсичними сполуками важких металів.

Тверді частинки та газоподібні забруднювачі проникають у дихальну систему людини, спричиняючи розвиток респіраторних і серцево-судинних захворювань. За даними епідеміологічних досліджень, тривалий вплив забрудненого повітря підвищує ризик виникнення бронхіальної астми, хронічного бронхіту, ішемічної хвороби серця та передчасної смертності. Особливу небезпеку становить смог, характерний для великих промислових міст, який є результатом поєднання транспортних і промислових викидів за несприятливих метеорологічних умов.

Мінімізація забруднення повітря потребує комплексних рішень, що передбачають низку технологічних, економічних та нормативно-правових заходів [4]. Пріоритетним напрямом є перехід до відновлюваних джерел енергії – сонячної, вітрової, гідро- та біоенергетики. Важливе значення має також підвищення енергоефективності промислових об'єктів і житлових будівель. Ефективними заходами також є розвиток низьковуглецевого громадського транспорту, впровадження електромобілів, а також посилення екологічних стандартів щодо викидів.

Актуальність теми дослідження викликана тим, що збереження поточних тенденцій домінування викопного палива в енергетичному балансі спричинить кумулятивний негативний вплив на кліматичну систему, довкілля та соціально-економічні процеси, що в довгостроковій перспективі сформує загрозу масштабних глобальних кризових явищ.

Запобігання цьому потребує своєчасного впровадження комплексних заходів, перед усім декарбонізації економіки, спрямованих на зменшення антропогенного навантаження на довкілля і недопущення екологічного колапсу. Серед пріоритетних напрямів – скорочення викидів парникових газів, перехід до ВДЕ, збереження та відновлення природних екосистем, а також формування моделей сталого виробництва і споживання.

Аналіз сучасних наукових досліджень і публікацій свідчить про високий рівень зацікавленості науковців усього світу проблематикою декарбонізації, як одного з ключових напрямів енергетичного переходу, зумовленого загостренням кліматичних змін, зростанням антропогенного навантаження на довкілля та необхідністю скорочення викидів парникових газів [3; 5]. При цьому, воднева енергетика розглядається перспективним шляхом декарбонізації енергетичного сектору, підвищення енергетичної безпеки та зниження негативного впливу на довкілля та переходу до сталого розвитку та формування низьковуглецевої економіки [6; 7; 8].

Значна частина досліджень зосереджена на технологіях виробництва «зеленого» водню, проблемах його зберігання та транспортування, а також можливостях інтеграції водню в існуючі енергетичні системи [9].

Порівняльний аналіз підходів українських учених до розвитку водневої енергетики засвідчує різноманітність наукових акцентів та методологічних підходів, що сформувалися в межах окремих наукових шкіл і напрямів досліджень. Коваленко В. С. та Лисенко О. М. основну увагу приділяють технологічним аспектам виробництва водню та можливостям його використання в енергетиці й транспорті, зокрема з позицій підвищення енергоефективності та екологічної безпеки [9]. Бондаренко О. В. зосереджується на аналізі перспектив

© В. І. Зацерковний, О. М. Васильєв, 2026

розвитку водневої енергетики в Україні, оцінці ресурсного потенціалу та економічної доцільності впровадження водневих технологій у національну енергетичну систему [10]. Шевченко І. В. та Петренко О. А. розглядають водневу енергетику переважно в контексті енергетичної безпеки держави та зниження викидів парникових газів, що підкреслює її стратегічне значення для сталого розвитку України [11]. Таким чином, наукові підходи українських дослідників взаємодоповнюють один одного, формуючи комплексне бачення ролі водневої енергетики в процесі декарбонізації економіки. Проте, проведений авторами аналіз літератури свідчить про переважно фрагментарний характер досліджень, обмежену кількість комплексних робіт, що поєднують технічні, економічні та нормативно-правові аспекти, що зумовлює актуальність подальших системних досліджень у цій сфері. Зокрема, актуальними залишаються питання перспектив розвитку водневої енергетики, її масштабування, економічної ефективності, інтеграції у національні енергетичні системи, а також оцінки довгострокових екологічних та соціально-економічних наслідків їх упровадження.

Мета дослідження є обґрунтування ролі ВДЕ та водневої енергетики у процесі декарбонізації економіки.

Завдання дослідження: аналіз сучасних тенденцій розвитку ВДЕ, оцінка потенціалу водневої енергетики та визначення перспектив їх спільного використання.

Виклад основного матеріалу. Сучасний етап розвитку цивілізації характеризується зростанням масштабів антропогенного впливу на довкілля, що проявляється у зміні клімату, деградації екосистем та зниженні рівня біорізноманіття. Однією з ключових причин зазначених процесів є надмірні викиди парникових газів, зумовлені використанням викопного палива в енергетиці, промисловості та транспорті. У зв'язку з цим декарбонізація розглядається як пріоритетний напрям екологічної та кліматичної політики, спрямований на недопущення екологічного колапсу.

Під декарбонізацією розуміють сукупність політичних, економічних і технологічних заходів, спрямованих на зниження інтенсивності викидів вуглецю та інших парникових газів у процесі господарської діяльності. Її реалізація передбачає трансформацію енергетичних систем, оптимізацію виробничих процесів, а також зміну моделей споживання з орієнтацією на принципи сталого розвитку.

У стратегічних документах Європейського Союзу та України визначено п'ять ключових напрямів декарбонізації економіки (табл. 1), реалізація яких спрямована на скорочення викидів парникових газів і досягнення кліматичної нейтральності [12–15]:

Таблиця 1 – Ключові напрямки декарбонізації економіки

№ п/п	Напрямок	Заходи
1	*Енергоефективність та енергозбереження*	*Зниження енергоємності економіки шляхом модернізації промисловості, будівель та інфраструктури.*
2	*Розвиток відновлюваних джерел енергії (ВДЕ)*	*Формування водневого ринку як одного з ключових елементів низьковуглецевої енергетичної системи.*
3	*Удосконалення системи поводження з відходами*	*Впровадження принципів циркулярної економіки та скорочення обсягів захоронення відходів.*
4	*Розвиток електротранспорту*	*Ефективний інструмент зменшення викидів у транспортному секторі.*
5	*Декарбонізація промисловості*	*Впровадження чистих технологій, альтернативних видів палива та систем уловлювання і зберігання вуглецю.*

Джерело: розроблено авторами.

Концепція декарбонізації ґрунтується на положеннях кліматології та екологічної економіки, відповідно до яких стабілізація кліматичної системи можлива лише за умов істотного скорочення антропогенних викидів парникових газів.

Основним практичним завданням декарбонізації є зменшення викидів вуглекислого газу (CO_2), метану (CH_4) та закису азоту (N_2O), які відіграють провідну роль у формуванні парникового ефекту. Скорочення їх концентрації в атмосфері досягається шляхом розвитку відновлюваної енергетики, підвищення енергоефективності, електрифікації транспортного сектору та впровадження технологій уловлювання і зберігання вуглецю.

Зниження обсягів викидів парникових газів сприяє зменшенню антропогенного навантаження на кліматичну систему та створює передумови для стабілізації глобального енергетичного балансу.

Декарбонізація безпосередньо впливає на динаміку кліматичних змін, оскільки скорочення викидів парникових газів дозволяє сповільнити зростання середньої глобальної температури. Це, у свою чергу, знижує ймовірність виникнення екстремальних кліматичних явищ, зокрема тривалих посух, інтенсивних опадів та теплових хвиль. Крім того, стабілізація кліматичних процесів сприяє збереженню кріосфери, морських та наземних екосистем, які є найбільш уразливими до кліматичних коливань.

Реалізація політики декарбонізації зменшує ризики деградації лісових, водних і ґрунтових екосистем, а також уповільнює процеси втрати біорізноманіття.

Зменшення викидів парникових газів і супутніх забруднювачів позитивно впливає на якість повітря та водних ресурсів, що є важливою передумовою підтримання екологічної рівноваги та безпеки життєдіяльності людини.

Таким чином, декарбонізація виступає науково обґрунтованим і стратегічно необхідним інструментом запобігання екологічному колапсу. Через скорочення викидів парникових газів вона забезпечує сповільнення зміни клімату та зниження ризиків для природних екосистем.

Ключовим інструментом декарбонізації економіки та переходу до кліматично нейтральної моделі розвитку виступають ВДЕ та воднева енергетика.

ВДЕ, зокрема сонячне випромінювання, енергія вітру, біомаса, гідроенергія та геотермальна енергія, розглядаються як ключові складові низьковуглецевої енергетичної системи та важливий інструмент декарбонізації економіки. Сонячна і вітрова енергетика характеризуються мінімальним рівнем викидів парникових газів на етапі експлуатації, однак їх змінна генерація зумовлює потребу в розвитку систем накопичення енергії та гнучких механізмів балансування енергосистеми. Біоенергетика має потенціал зменшення антропогенного навантаження за рахунок утилізації органічних відходів, проте її екологічна ефективність залежить від сталості сировинної бази та технологій переробки. Гідроенергетика забезпечує стабільне виробництво електроенергії з низьким вуглецевим слідом, водночас потребуючи врахування впливу на водні та прибережні екосистеми. Геотермальна енергія вирізняється високою надійністю та здатністю забезпечувати базове навантаження, однак її впровадження обмежується геологічними та економічними чинниками. У сукупності зазначені особливості свідчать про доцільність комплексного використання різних видів відновлюваних джерел енергії з урахуванням регіональних, технологічних та екологічних умов.

ВДЕ характеризуються часовою варіабельністю виробництва, зумовленою наявністю як добових, так і сезонних коливань генерації. Через це відновлювальна енергетика не спроможна самостійно забезпечити безперервне постачання енергії [16] і потребує оперативного балансування, розподілу та споживання, що за відсутності достатніх потужностей

накопичення та гнучких механізмів управління енергосистемою істотно ускладнює її інтеграцію в електроенергетичні мережі. Вирішити цю проблему дозволяє воднева енергетика, яка виконує функцію системного інтегратора, підвищуючи гнучкість енергосистеми та сприяючи ефективнішому використанню ВДЕ в процесі декарбонізації.

Водень, з одного боку, виступає універсальним енергоносієм, який може застосовуватися в енергетиці, промисловості та транспортному секторі та в опаленні житлово-комунального господарства без утворення прямих викидів парникових газів, за умови використання низьковуглецевих технологій виробництва, а з іншого – як перспективний засіб довгострокового акумулювання енергії (дозволяє перетворювати надлишкову електроенергію з ВДЕ для виробництва чистого водню з подальшим його зберіганням і використанням у періоди дефіциту генерації від ВДЕ).

Водень – це хімічний елемент з атомним номером 1 у Періодичній системі хімічних елементів. Він є найлегшим елементом і водночас найпоширенішим у Всесвіті, становлячи основну масу зірок і міжзоряного простору. Позначається символом H, належить до 1 періоду та умовно розміщується в 1 групі, хоча за своїми властивостями суттєво відрізняється від лужних металів. Це неметал, який здатний проявляти як відновні, так і (рідше) окисні властивості. За нормальних умов водень – це безбарвний, без запаху і смаку газ, який у 14 разів легший за повітря. Він має дуже низькі температури плавлення (–259°C) і кипіння (–253°C), погано розчиняється у воді та характеризується високою дифузійною здатністю.

У природі водень існує переважно у вигляді двохатомних молекул H_2. Це горючий газ, який при взаємодії з киснем згоряє з утворенням води. Водень активно реагує з неметалами (киснем, галогенами), з металами утворює гідриди, а також відновлює оксиди металів до простих речовин. На Землі водень рідко трапляється у вільному стані. Найчастіше він входить до складу води, органічних речовин, кислот і мінералів. У космічному просторі водень є основним «паливом» термоядерних реакцій у зірках.

Водень широко використовується в промисловості: для синтезу аміаку, у нафтопереробці, металургії, ракетній техніці та перспективній водневій енергетиці як екологічно чисте паливо.

Стійке зростання енергоспоживання та посилення вимог до скорочення викидів парникових газів актуалізують необхідність впровадження енергоносіїв із високим коефіцієнтом корисної дії (ККД) та мінімальним вуглецевим слідом протягом усього життєвого циклу. Водень характеризується однією з найвищих питомих теплот згоряння серед хімічних енергоносіїв (до 120 МДж/кг) [19], що істотно перевищує відповідні показники традиційних викопних палив. За умови використання водню в паливних елементах загальний ККД перетворення енергії може сягати 55–65 %, а в когенераційних системах – понад 80 %. При цьому кінцевим продуктом окиснення водню є вода, що забезпечує відсутність прямих викидів CO_2 під час його використання та робить водень перспективним інструментом декарбонізації енергетики, транспорту й промисловості [17; 18].

Найбільша ефективність використання водню досягається в електрохімічних системах – паливних елементах. У таких установках хімічна енергія водню безпосередньо перетворюється на електричну, що дозволяє досягати коефіцієнта корисної дії на рівні 60–70 % [19]. Це значно перевищує ефективність традиційних теплових електростанцій, де значна частина енергії втрачається у вигляді тепла [20].

Водень може ефективно використовуватися як засіб акумулювання енергії, отриманої з відновлюваних джерел. Надлишкова електроенергія, вироблена сонячними або вітровими електростанціями, може застосовуватися для електролізу води з подальшим зберіганням енергії у вигляді водню [17; 18]. Це сприяє підвищенню загальної енергетичної

ефективності енергосистем, роблячи водневі технології доволі перспективними в сучасній енергетиці. А використання водню в паливних елементах і системах відновлюваної енергетики дозволяє досягти високого ККД та мінімізувати негативний вплив на довкілля [17–20]. Крім того, перевагою водню є висока енергетична щільність та можливість зберігання тривалий час.

За кількістю атомів водень належить до найпоширеніших елементів земної кори. За даними геохімічних досліджень, з кожних 100 атомів земної кори приблизно 17 становлять атоми водню [22]. Така висока атомна частка пояснюється участю водню у складі численних хімічних сполук, зокрема води, гідроксидів і органічних речовин. Попри значну атомну поширеність, масова частка водню є відносно невеликою. Встановлено, що водень складає близько 0,88 % від загальної маси Землі, якщо враховувати атмосферу, літосферу та гідросферу [23; 24]. Це зумовлено надзвичайно малою атомною масою водню порівняно з іншими елементами, такими як кисень, кремній чи залізо.

Основна кількість водню зосереджена в гідросфері**,** де він входить до складу молекул води. Значна частка водню міститься також у літосфері – у складі мінералів, кислот і гідроксидів [24]. В атмосфері водень наявний у незначних концентраціях, оскільки через малу густину він легко залишає гравітаційне поле Землі [25].

Основним джерелом водню є вода, яка у великих обсягах міститься в гідросфері. Окрім води, джерелами водню є також природний газ, біомаса, органічні сполуки та промислові відходи**,** що забезпечує різноманітність методів його виробництва та можливість широкого застосування в різних регіонах світу [24]. Завдяки практично необмеженій сировинній базі водень може відтворюватися практично безперервно. На відміну від традиційних енергоресурсів, запаси яких є скінченними, виробництво водню може здійснюватися за рахунок природних циклів та відновлюваних джерел енергії. Це робить водень потужним і стратегічно важливим елементом майбутньої енергетичної системи [17; 21].

Порівняння енергоносіїв за питомою енергією (кількістю енергії, що виділяється під час повного згоряння одиниці маси палива) та викидами діоксиду вуглецю (табл. 2) свідчить, що водень має суттєві переваги над традиційними видами палива.

Він суттєво перевершує традиційні викопні енергоносії за питомою енергоємністю та екологічними показниками, зокрема відсутністю прямих викидів CO_2 при використанні.

Високий енергетичний потенціал у поєднанні з відсутністю вуглецевих викидів визначає водень як один із ключових елементів переходу до сталої та екологічно безпечної енергетики. Його використання дозволяє зменшити залежність від викопних палив, підвищити енергетичну безпеку та скоротити викиди шкідливих речовин у навколишнє середовище [18; 21]. А можливість інтеграції з ВДЕ робить водень важливою складовою енергетики майбутнього.

Водночас його ключовими технічними обмеженнями залишаються низька об’ємна енергетична щільність та підвищена складність зберігання і транспортування, що зумовлює необхідність розвитку відповідної інфраструктури та технологій.

Основні переваги та недоліки застосування водню над традиційними енергоносіями, за даними [4], представлені відповідно в табл. 3 та табл. 4.

Зростання інтересу до водню як альтернативного енергоносія зумовило активний розвиток технологій його виробництва. Водночас екологічна ефективність водневих технологій значною мірою залежить від кількості викидів CO_2, що утворюються на стадії отримання водню. Тому актуальним є поділ технологій виробництва водню за рівнем вуглецевого сліду [17].

Таблиця 2 – Порівняння водню та традиційних енергоносіїв за показниками питомої енергії та обсягами викидів діоксиду вуглецю під час їх використання [20]

Показник	**Водень (H_2)**	**Природний газ (CH_4)**	**Нафтопродукти (бензин/дизель)**
Питома теплота згоряння, МДж/кг	~120	~50	42–46
Об'ємна енергетична щільність, МДж/м³ (н.у.)	~10,8	~35–39	~32 000 (у рідкому стані)
ККД перетворення енергії	55–65 % (паливні елементи), >80 % (когенерація	35–55 % (ДВЗ, ТЕС, ТЕЦ)	25–40 % (ДВЗ)
Прямі викиди CO_2 при використанні	0	~56 кг CO_2/ГДж	70–75 кг CO_2/ГДж
Викиди забруднювальних речовин (NO_x, SO_x, PM)	Мінімальні / відсутні	Помірні	Високі
Продукт згоряння / реакції	H_2O	CO_2, H_2O	CO_2, H_2O, NO_x, SO_x
Відновлюваність	Потенційно повністю відновлюваний	Невідновлюваний	Невідновлювані
Складність зберігання і транспортування	Висока (тиск, кріоумови)	Середня	Низька
Вуглецевий слід (LCA)	Дуже низький (зелений водень)	Середній	Високий

Таблиця 3 – Основні переваги застосування водню над традиційними енергоносіями [20]

Нульові викиди при використанні	Весь процес виробництва екологічно безпечний і не забруднює навколишнє середовище. Чистота водню досягає 99,999%. В паливних елементах водень реагує з киснем, виробляючи електроенергію без утворення CO_2,, тепло і водяну пару, що робить його ідеальним джерелом енергії для кліматично прийнятних рішень. Він має запобігти глобальному потеплінню.
Висока щільність енергії	За масою водень володіє найвищою питомою енергією. Це означає, що навіть його невелика кількість може забезпечити рух транспортних засобів на значні відстані. Наприклад, автобуси на водневих паливних елементах зазвичай мають запас ходу близько 500 км, порівняно з 200 км в електробусів.
Універсальність	Водень може використовуватись для живлення транспортних засобів (автомобілів, вантажівок, суден та літаків), опалення будинків (у суміші з природним газом або окремо), та слугувати сировиною для таких галузей як виробництво металів і добрив.
Спроможність накопичувати енергію	Надлишкова відновлювальна енергія (від вітру або Сонця) може використовуватись для виробництва зеленого водню, який потім може зберігатись у своїй первинній формі значно довше для наступного використання, на відміну від акумуляторів, балансуючи енергосистему.
Економічна ефективність	Зменшення витрат на обладнання за рахунок зменшення експлуатаційних витрат на технічне обслуговування, що дає відмінні економічні переваги для крупномасштабного виробництва.
Модульність та масштабованість виробництва	Удосконалені системи електролізу лужної води для вироблення зеленого водню містять в собі кілька незалежних електролізів, використовуючи одну систему допоміжного обладнання. Це істотно зменшує капітальні і поточні витрати на технічне обслуговування. Гнучка модульна конструкція дозволяє розширювати потужності у відповідності з виробничими потребами.
Поширеність	Водень – найпоширеніший елемент Всесвіту, тому може забезпечити безмежну кількість виробництва чистої енергії 70-80% в оптимальних умовах.

Таблиця 4 – Основні недоліки застосування водню над традиційними енергоносіями

Назва недоліку	Опис
Висока займистість та вибухонебезпечність	Водень має широкий діапазон займистості (від 4% до 75% у повітрі) та дуже низьку енергію займання і легко змішується з повітрям. Це означає, що навіть невелика іскра може спричинити вибух чи пожежу.
Складність та висока вартість виробництва	Воднева енергетика не є первинним джерелом енергії. Це спосіб збереження і передачі вже виробленої енергії. Як наслідок, викиди, що пов'язані з виробництвом водню сильно залежать від використовуваної енергії. Складність та висока вартість виробництва водню. За даними Міжнародного енергетичного агентства (МЕА) вартість виробництва «чистого» водню з використанням низьковуглецевих джерел енергії становить від 3,2 до 7,39 дол. США/кг. Однак технологічні досягнення можуть дозволити зменшити ці витрати найближчим часом. За прогнозами МЕА до 2060 року, вартість виробництва наблизиться до 1,3-3,3 дол. США/кг. Водень потребує спеціальних умов зберігання (високого тиску або кріогенних температур).
Низька ефективність перетворення енергії	Перетворення електроенергії у водень, його збереження, а потім зворотне перетворення в електроенергію в паливному елементі двигуна є вкрай неефективним. Загальна ефективність не перевищує 25-40% порівняно з понад 80-90% для акумуляторних електричних систем.
Низька об'ємна щільність енергії	Водень – найлегший елемент у світі, який володіє низькою об'ємною щільністю енергії. В нестиснутому стані кількість енергії в 1 літрі водню складає приблизно четвертину від кількості енергії бензину. Для збереження достатньої кількості водню для забезпечення практичного запасу ходу транспортних засобів його необхідно стискати до екстремально високого тиску (до 700 бар) або скраплювати при кріогенних температурах (–253°C), що є енергоємним дорогим процесом. Але стиснення водню – дорогий процес, який створює додаткові фінансові перешкоди для впровадження водневої енергетики.
Невидимість полум'я	При загорянні водень має тьмяне полум'я (є майже невидимим), що надзвичайно ускладнює його виявлення та гасіння без тепловізійного обладнання.
Ризик задухи та обмороження	Вдихання «чистого» водню призводить до асфіксії (нестачі кисню), а рідкий водень може викликати сильні обмороження
Витоки та воднева крихкість	Атоми водню є доволі малими за розмірами і можуть легко проникати у тверді метали та ущільнення, викликаючи водневу крихкість, яке послаблює стальні трубопроводи і резервуари, потенційно спричинюючи тріщини та руйнування конструкції. Це ускладнює зберігання та транспортування водню.
Інфраструктурна обмеженість	Обмежена кількість заправок. Існує гостра нестача водневих заправних станцій порівняно з автозаправними станціями або пунктами зарядки електромобілів, що робить подорожі на далекі відстані непрактичними для більшості споживачів.
Витрати на модернізацію	Існуючі газопроводи природного газу не можуть бути легко перепрофільовані для чистого водню, через крихкість та витоки, що вимагає багатомільярдних інвестицій в спеціалізовану інфраструктуру.
Білі плями технології	Вплив водневого очищення на складні сучасні датчики двигунів та системи очищення вихлопних газів вивчений не до кінця.

Джерело: розроблено авторами.

Для систематизації та порівняльної оцінки різних технологій виробництва водню у світовій практиці широко застосовується колірна схема класифікації (табл. 5), яка відображає джерело первинної енергії, технологічний процес отримання водню та рівень пов'язаних із цим викидів парникових газів, насамперед CO_2.

Такий підхід дає змогу комплексно оцінювати екологічну ефективність, вуглецевий слід і потенціал декарбонізації кожної з технологій у межах життєвого циклу. Крім того, вона є зручною для розуміння екологічних наслідків кожного методу видобутку водню.

Колірне позначення виробництва водню відображає не фізичні властивості газу, а спосіб його отримання та вуглецевий слід, що супроводжує процес виробництва. Наведена класифікація дозволяє об'єктивно оцінити екологічну доцільність видобутку водню.

Таблиця 5 – Класифікація H_2 за кількістю CO2, що виділяється при його виробництві [1-7]

Позначення водню	Характеристика
Зелений H2	Отримують шляхом електролізу води з використанням відновлюваної електроенергії (сонячної, вітрової та гідро) за технологією power-to-gas (P2G). Хімічна формула виробництва: 2H20 →2H2+O2. Один з найбільш бажаних способів видобутку H2. Але це досить коштовний спосіб, через великі втрати електроенергії в ході процесу електролізу. Зараз для виробництва 1 м3 зеленого H2 потрібно 3-5 кВт/год електроенергії. Зеленим його називають тому, що він на 100% є екологічним і найперспективнішим з точки зору декарбонізації різних секторів економіки. Для його видобутку потрібна лише вода, електроенергія та електролізер. В процесі електролізу пропускається електричний струм через H2O і відбувається розчеплення молекули H2O на два атоми H і один атом O. Технологія електролізу лужної води має тривалу історію, відпрацьовані процеси та високу технічну надійність. Збільшення видобутку альтернативної енергії передбачає збільшення видобутку зеленого H2. Зелений H2 сумісний з кліматично нейтральним майбутнім, оскільки є абсолютно екологічним.
Блакитний H2	Отримують шляхом парової конверсії метану (CH4) – (steam methane reforming, SMR) за умови уловлювання та збереження CO2 (технологія carbon capture and storage, CCS). Хімічна формула виробництва: CH4+2H2O CO2+4H2. Вартість до дол. США/кг. Проте, 10-20% утвореного CO2 вловити не вдається. Існує кілька істотних недоліків добування водню в промислових масштабах, оскільки, по-перше неможливо створити нескінченне сховище для відпрацьованого вуглецю, а по-друге, для уловлювання вуглецевих відходів використовують CH4, який на два порядки (у 100 разів) сильніше нагріває атмосферу, на відміну від CO2. Оскільки CO2 при одержанні H2 виділяється відносно мало, то процес виробництва класифікують як вуглецево-нейтральний. Його екологічність значною мірою залежить від ефективності і надійності фільтруючих технологій.
Сірий H2	Отримують з викопного палива (газу, вугілля або нафти) як побічний продукт переробки під дією високих температур і тиску без уловлювання парникових газів. Хімічна формула виробництва: CH4+2H2O CO2+4H2. Вартість 2-3 дол. США/кг. Це найдешевший та найбільш поширений метод, проте не має екологічного статусу, оскільки при добуванні сірого водню виділяється велика кількість CO_2, (10-12 кг CO2 на 1 кг H2), що робить його неприпустимим джерелом енергії. На сьогодні 95-96% світового водню одержують з природного газу шляхом парового риформінгу, при цьому в атмосферу надходить біля 9,3 кг CO2 на 1 кг отриманого водню, що часто нівелює екологічні переваги використання водню в місці споживання.
Коричневий (чорний) H2	Отримують з вугілля (коричневий) шляхом газифікації вугілля або інших викопних видів палива без фільтрації. Хімічна формула виробництва: 2H2O+C H2 CO. Вартість 2-3 дол. США/кг. Чорний та коричневий кольори відносяться до бітумінозного (чорного) і бурого (бурого вугілля). Процес є надзвичайно брудним. Викиди CO2 найвищі. CO2 і чадний газ є побічними продуктами і викидаються в атмосферу, що суттєво сприяє парниковому ефекту. Застосовується переважно в країнах із великими запасами вугілля.
Бірюзовий H2	Добувається в процесі термічного розщеплення метану на водень та твердий вуглець замість CO2 за допомого піролізу. Хімічна формула виробництва: CH4+2H2O CO2+4H2. Вартість до 5 дол. США/кг. Може здатися відносно сталим з точки зору викидів, оскільки вуглець може або бути вловлений, або використаний для виробництва сталі або акумуляторів. Проте, технології використання уловлювання вуглецю є актуальними. Крім того, метан є парниковим газом, а його витоки можуть впливати на клімат.
Фіолетовий H2	Одержують за допомогою ядерної енергії та тепла шляхом комбінованого електролізу розчеплення води. Хімічна формула виробництва: CH4+2H2O CO2+4H2.
Рожевий H2	Генерується шляхом електролізу води за допомогою електроенергії з атомної електростанції, зберігаючи низькі викиди, але з урахуванням аспектів поводження з ядерними відходами
Червоний H2	Виробляється шляхом високотемпературного каталітичного розщеплення води з використанням як джерела ядерної енергії.
Жовтий H2	Добувається шляхом електролізу води атомною енергією за технологією power-to-gas (P2G). Хімічна формула виробництва: CH4+2H2+O. Викиди вуглецю відсутні, однак добутий таким чином водень є доволі коштовним, 9 -10 дол. США/кг.
Білий H2	Відноситься до природного водню, що зустрічається в газоподібному стані в природі в геологічних формаціях (підземних покладах).
Золотий H2	Отримують ферментацією мікроорганізмами у виснажених свердловинах, що забезпечує низьковуглецевий або потенційно нейтральний процес виробництва.

Найбільш перспективним з погляду сталого розвитку є зелений водень, тоді як сірий і блакитний водень можуть розглядатися як перехідні варіанти на шляху до повної декарбонізації енергетики [7; 17; 22].

Зелений водень є одним із ключових видів палива в середньостроковій перспективі розвитку енергетичних систем, оскільки володіє високим потенціалом для декарбонізації промисловості, транспорту та електроенергетики, а також можливістю інтеграції з ВДЕ.

Виробництво зеленого водню сьогодні здійснюється шляхом електролізу води з використанням електроенергії з відновлюваних джерел і практично не супроводжується викидами діоксиду вуглецю, що відповідає цілям кліматичної нейтральності та сталого розвитку [7]. У середньостроковій перспективі (10–20 років) очікується зниження вартості електролізерів і відновлюваної електроенергії, що підвищить конкурентоспроможність зеленого водню порівняно з традиційними видами палива [27].

У цьому контексті особливого значення набуває оцінка технічного потенціалу зеленого водню та його співвідношення з майбутніми енергетичними потребами людства [7; 27].

Технічний потенціал зеленого водню визначається як максимально можливий обсяг його виробництва з використанням відновлюваних джерел енергії за умови врахування реальних обмежень. До таких обмежень належать природно-заповідні території, ліси, водно-болотні угіддя, населені пункти, території зі значними ухилами місцевості, а також регіони з обмеженою доступністю прісної води для електролізу. Як свідчать результати сучасних досліджень, навіть з урахуванням зазначених обмежень технічний потенціал зеленого водню є надзвичайно високим. За оцінками міжнародних енергетичних організацій, сукупний потенціал виробництва зеленого водню у світі майже у 20 разів перевищує прогнозований глобальний попит на первинну енергію у 2050 році [29, 22]. Це свідчить про доцільність розгляду виробництва зеленого водню як одного з ключових елементів майбутньої глобальної енергетичної системи та важливого інструмента досягнення кліматичної нейтральності.

Світовий досвід свідчить, що воднева енергетика поступово переходить від концептуального рівня до практичної реалізації (табл. 6).

Таблиця 6 – Світовий досвід впровадження водневої енергетики [8-11]

Регіон	Характеристика
Європейський Союз	Лідер у впровадженні водневої енергетики. В рамках Європейської водневої стратегії водень розглядається як ключовий елемент досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року. Основний акцент зроблено на розвитку зеленого водню, створенні водневої інфраструктури та інтеграції водню в енергетичні ринки. Значна увага приділяється розвитку водневих трубопроводів, використанню водню в промисловості та важкому транспорті. У рамках стратегій ЄС планується встановити десятки гігават електролізерів до 2030 року з метою виробництва мільйонів тонн водню на рік.
Німеччина	Однією з перших ухвалила Національну водневу стратегію, у межах якої водень визначено стратегічним енергоносієм для досягнення кліматичних цілей. Країна активно інвестує у виробництво зеленого водню, створення демонстраційних проєктів та міжнародне співробітництво з країнами-експортерами водню.
Японія	Виступає піонером у впровадженні водню в транспортному секторі та енергетиці. Воднева стратегія країни передбачає широке використання водню в паливних елементах, розвиток водневих заправних станцій та імпорт водню з інших регіонів світу. Японія розглядає водень як основу майбутньої безвуглецевої економіки.
Південна Корея	Активно розвиває водневу енергетику в рамках концепції «водневого суспільства». Основна увага приділяється виробництву водневих транспортних засобів, розвитку інфраструктури та використанню водню в електроенергетиці.
Сполучені Штати Америки	Воднева енергетика розвивається як на федеральному, так і на регіональному рівнях. Програми підтримки спрямовані на зниження вартості зеленого водню, розвиток водневих кластерів та використання водню в промисловості та транспорті. Водень розглядається як важливий інструмент скорочення викидів парникових газів.
Австралія	Позиціонує себе як майбутній глобальний експортер зеленого водню завдяки значному потенціалу сонячної та вітрової енергетики. Країна активно інвестує в інфраструктуру виробництва та експорту водню до країн Азійсько-Тихоокеанського регіону.
Китай	Домінує у світовій сумарній потужності електролізерів та їх виробництві, що становить значну частку глобального ринку. Одним із прикладів індустріальних кластерів є Changzhou Hydrogen Bay – спеціальний економічний район у провінції Цзянсу з комплексною водневою інфраструктурою для випробувань та масового впровадження водневих технологій.
Близький Схід	Країни регіону виходять на міжнародну арену як нові центри виробництва «зеленого» водню. Зокрема в Саудівській Аравії планується побудувати один із найбільших у світі комплексів для виробництва зеленого водню та аміаку потужністю сотні тисяч тонн щорічно з використанням сонячної та вітрової енергії. Він реалізується за участю китайської компанії Sinopec Engineering Group у партнерстві з місцевими підприємствами.

Функціонування ринку водню, а також вимоги до операторів водневих трубопровідних мереж у країнах Європейського Союзу визначаються Директивою (ЄС) 2024/1788 та Регламентом (ЄС) 2024/1789**.** Зазначені нормативно-правові акти формують комплексну правову основу для розвитку водневої інфраструктури та інтеграції водню в єдиний енергетичний ринок ЄС.

Основні нормативні документи, що регламентують засади кліматичної нейтральності та водневої трансформації у деяких країнах світу представлені в табл. 7.

Таблиця 7 – Основні нормативні документи, що регламентують засади кліматичної нейтральності та водневої трансформації у деяких країнах світу [14; 15; 30; 33]

Країна	Назва документу	Рік
Україна	Воднева стратегія (проект)	2021
	Про відповідальне використання природних ресурсів (проект)	2021
	Про енергетичну ефективність (Закон України)	2022
	Стратегія низьковуглецевого розвитку України до 2050 року	2018
	Стратегія екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату на період до 2030 року	2021
Японія	Japan's National Strategy for Hydrogen and Fuel Cell Technology	2014
Китай	Hydrogen and Fuel Cell	2002
США	United States National Hydrogen Technology Strategy	2003
Великобританія	Energy Act	2008
	UK hydrogen strategy	2022
Європейський Союз	Directive 2003/87/EC dated 13.10.2003 Regarding the establishment of a scheme to reduce greenhouse gas emissions by trading within the Community	2003
	The European Climate Change	2000
	Paris Climate Agreement	2015
	The European Green Deal	2020
	Strategy for Energy System Integration	2019
	A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe	2020
	"Fit for 55"	2021
Італія	Italian hydrogen strategy	2020
	Budget Law 2007 - Energy efficiency provisions	2007
Ірландія	Low Carbon Homes Program	2008
Угорщина	National Energy Conservation Program 2008 (NEP 2008)	2008
Франція	Retailer Sustainable Commerce Agreement	2008
	The French green hydrogen plan 2020-2030	2020
Німеччина	Renewable Energies Heat Act	2009
	The National Hydrogen Strategy	2022
Польща	Polish Energy Policy until 2030	2009
	"My Electricity" Program	2019
	Energy Plus Priority Program	2019
	Polish Geothermal Energy Plus Program	2019
	Energy Law	2021
	National Recovery Plan	2022
Іспанія	Spanish Strategy on Climate Change and Clean Energy 2007-2012-2020	2020
	Recovery, transformation and resilience plan / Modernisation of public administration (IV)	2021
	Spain 2050 strategy: circular and carbon-neutral economy	2021

Картосхема потенціалу сонячної та вітрової енергії у світі з приведеною вартістю виробництва чистого (зеленого) водню представлена на рис. 1.

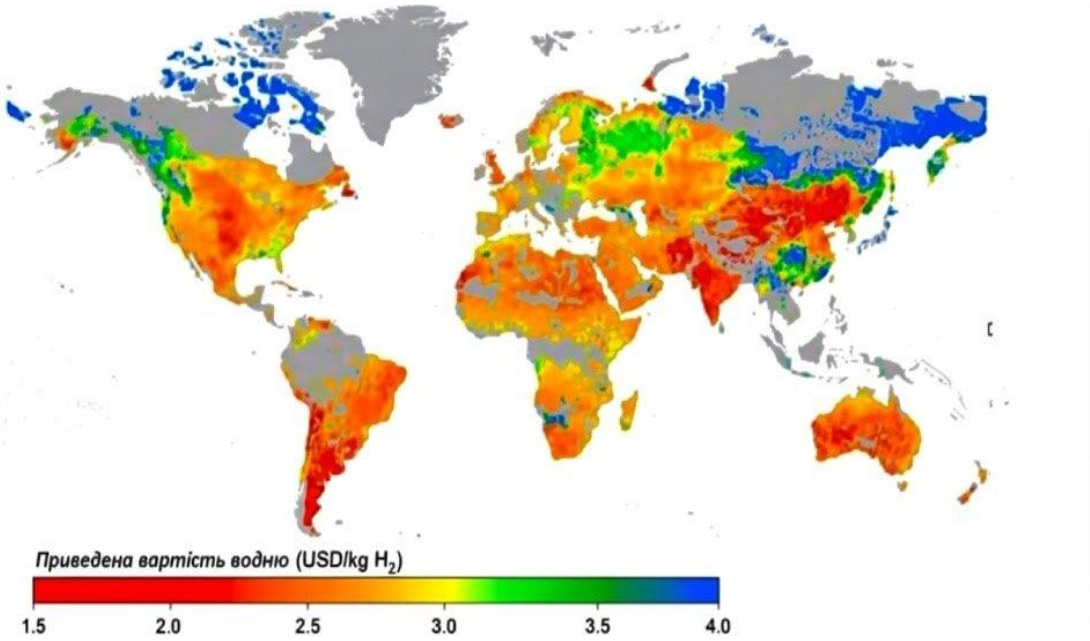


Рис. 1. Картосхема потенціалу сонячної і вітрової енергії у світі з приведеною вартістю виробництва чистого водню [16; 17; 21]

Центральне місце у цих планах займає розгортання електролізерів – установок, для вироблення водню за рахунок електролізу води, використовуючи ВДЕ [30]. Потужність вже наявних електролізерів у деяких країнах світу, за даними [31] представлена на рис. 2.

Рис. 2. Потужність наявних електролізерів у деяких країнах світу [33]

Провідні країни світу розглядають водень як стратегічний енергоносій, здатний забезпечити декарбонізацію економіки, підвищення енергетичної безпеки та розвиток інноваційних технологій. Вони визначають водень ключовим елементом декарбонізації.

За оцінками Європейської комісії, попит ЄС на відновлюваний водень до 2050 року становитиме 20–30 млн т/рік.

Просторова локалізація ключових європейських проєктів використання низьковуглецевого або відновлюваного водню представлена на рис. 3.

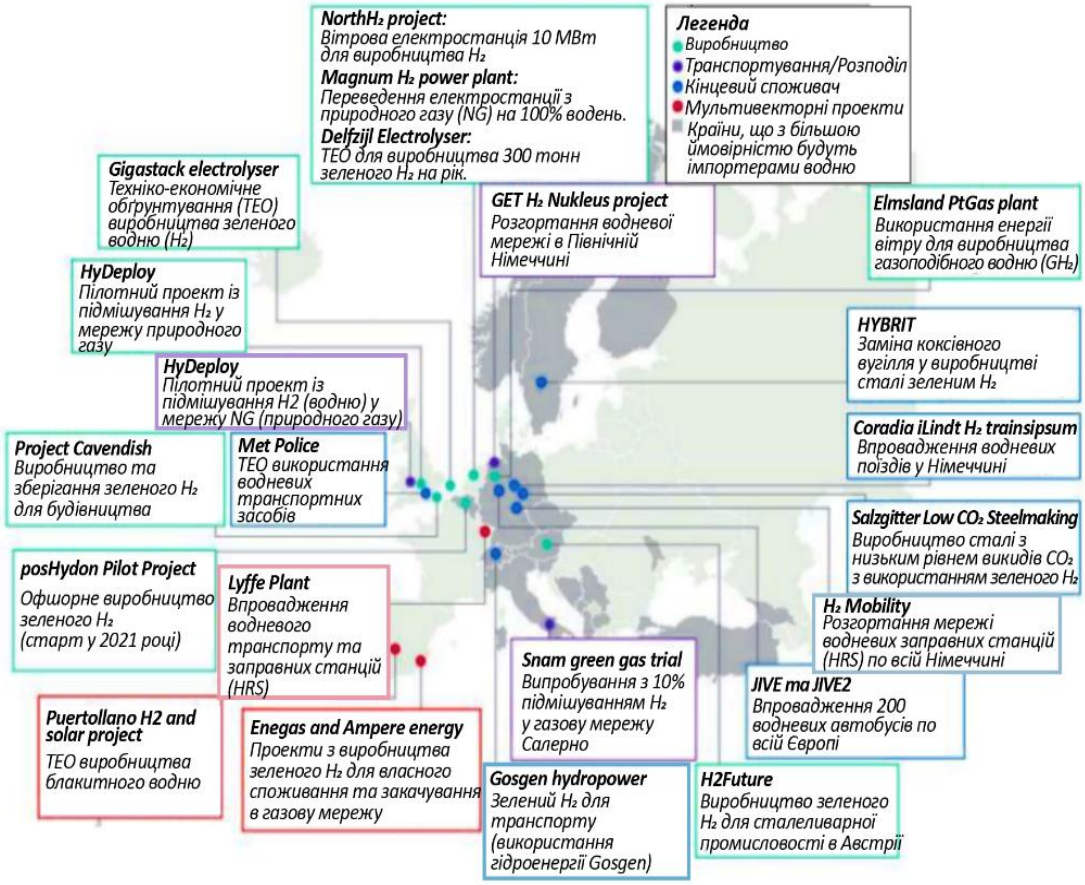


Рис. 3. Просторова локалізація ключових європейських проєктів використання низьковуглецевого або відновлюваного водню

Джерело: розроблено авторами за джерелами [12; 13].

Україна має всі необхідні передумови, щоб стати пріоритетним партнером у виробництві зеленого водню: потужний ресурсний потенціал, вигідне географічне розташування, інфраструктуру та людський капітал.

За прогнозами, близько 75 % виробленого зеленого водню Україна експортуватиме до Європейського Союзу, тоді як решта обсягів використовуватиметься для задоволення внутрішніх енергетичних потреб країни [32]. Кількісна оцінка потенціалу виробництва зеленого водню базується на визначенні обсягів електричної енергії, що може бути вироблена з відновлюваних джерел, та ефективності процесу електролізу води.

Оцінка потенціалу України з виробництва зеленого водню. Україна має сприятливі умови для виробництва «зеленого» водню завдяки значному потенціалу вітрової та сонячної енергетики, розвинутій науковій базі, наявності промислових підприємств, які можуть бути модернізовані для нових потреб, а також вигідному географічному положенню на перетині енергетичних маршрутів між Сходом і Заходом. За оцінками Держенергоефективності, потенціал України з виробництва зеленого водню може досягати до 10 млн т на рік при повному використанні ВДЕ (табл. 8).

Таблиця 8 – Прогноз виробництва зеленого водню в Україні (за сценаріями)

Сценарій	Потужність ВДЕ (ГВт)	Виробництво H2 (млн т/рік)	Частка експорту (%)
Оптимістичний	30	8–10	70
Помірний	20	4–5	50
Обережний	10	1,5–2,5	30

Джерело: розроблено авторами.

Основними чинниками такого прогнозу виступають [25]:
– наявність понад 25 ГВт потенційної потужності ВДЕ;
– близькість до кордонів ЄС для експортних поставок;
– вже існуюча інфраструктура магістральних газопроводів.

Технічно-досяжний потенціал вироблення енергоносіїв з ВДЕ та альтернативних видів палива, становить понад 98,0 млн т у. п. на рік за даними [33] і представлений у табл. 9.

Таблиця 9 – Технічно-досяжний потенціал вироблення енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива в Україні

№ з/п	Напрями освоєння ВДЕ	Річний технічно-досяжний енергетичний потенціал, млн. т у. п.
1.	Вітроенергетика	28,0
2.	Сонячна енергетика, в тому числі	6,0
2.1.	– електрична	2,0
2.2.	– теплова	4,0
3.	Мала гідроенергетика	3,0
4.	Біоенергетика, в тому числі:	31,0
4.1.	– електрична	10,3
4.2.	– теплова	20,7
5.	Геотермальна теплова енергетика	12,0
6.	Енергія довкілля (теплові насоси)	18,0
Загальний обсяг заміщення традиційних ПЕР		**98,0**

Джерело: розроблено авторами.

Для аналізу перспектив розвитку водневої енергетики в Україні скористаємося SWOT-аналізом, який представлений на рис. 4.

Абревіатура SWOT походить від англійських слів: Strengths (сильні сторони), Weaknesses (слабкі сторони), Opportunities (можливості) та Threats (загрози)

SWOT-аналіз перспектив розвитку водневої енергетики в Україні

S – Strengths (Сильні сторони) *– значний потенціал відновлюваних джерел енергії (сонячної та вітрової), придатних для виробництва «зеленого» водню;* *– розгалужена газотранспортна система, яка потенційно може бути адаптована для транспортування водню або водневих сумішей;* *– вигідне географічне розташування поблизу основних ринків споживання водню в ЄС;* *– потужна промислова та інженерна база, наявність кваліфікованих кадрів;* *– інтеграція України в європейські енергетичні та кліматичні ініціативи.*	***W – Weaknesses (Слабкі сторони)*** *– відсутність повноцінної національної водневої стратегії, завершеної нормативно-правової бази та стандартів;* *– високі капітальні витрати на виробництво, зберігання та транспортування водню;* *– обмежений внутрішній ринок споживання водню;* *– недостатній рівень інвестиційної привабливості через економічні та воєнні ризики;* *– низький рівень комерціалізації наявних наукових розробок.*
O – Opportunities (Можливості) *– зростання попиту на низьковуглецевий водень у країнах ЄС у межах Green Deal та Fit for 55;* *– можливість диверсифікації експорту енергоресурсів та зменшення залежності від традиційних палив;* *– отримання міжнародної фінансової та технічної підтримки (ЄС, ЄБРР, Світовий банк) ;* *– використання водню для декарбонізації промисловості, транспорту та енергетики;* *– створення нових високотехнологічних робочих місць і розвиток інноваційних кластерів.*	***T – Threats (Загрози)*** *– тривала воєнна та геополітична нестабільність, ризики пошкодження інфраструктури;* *– конкуренція з боку інших країн-експортерів водню (Північна Африка, Близький Схід, Австралія) ;* *– технологічна невизначеність та швидка еволюція водневих технологій;* *– волатильність цін на електроенергію з ВДЕ;* *– можливе посилення регуляторних вимог ЄС до сертифікації водню.*

Рис. 4. SWOT-аналіз перспектив розвитку водневої енергетики в Україні

Джерело: розроблено авторами.

SWOT-аналіз свідчить, що Україна володіє значними передумовами для становлення як важливого виробника та експортера «зеленого» водню, однак реалізація цього потенціалу потребує системних інституційних реформ, розвитку внутрішнього ринку та зниження інвестиційних ризиків. Максимізація можливостей можлива за умови активної інтеграції у європейський водневий ринок і цілеспрямованої державної підтримки.

Усе це свідчить про високі потенційні можливості виробництва зеленого водню в Україні.

Річний обсяг виробництва водню можна визначити за формулою:

$$M_{H_2} = \frac{E_{\text{ВДЕ}} \cdot \eta_{el}}{e_{H_2}},$$

де M_{H_2} – річний обсяг виробництва водню, т/рік;

$E_{\text{ВДЕ}}$ – річний обсяг виробництва електроенергії, з ВДЕ, кВт/рік;

η_{el} – коефіцієнт корисної дії електролізера (0,65-075);

e_{H_2} – питомі витрати електроенергії на виробництво 1 кг водню, кВт·год/кг (48-55).

Для розрахунків приймемо 50 кВт·год/кг, η_{el}=0,7.

Розрахунок технічно досяжного потенціалу ВДЕ України представлений в табл. 10.

Таблиця 10 – Технічно досяжний потенціал ВДЕ України

Вид ВДЕ	Потужність, ГВт	Середній коефіцієнт використання	Річне виробництво, ТВт·год
Сонячна енергетика	70–90	0,14–0,16	85–120
Вітрова (наземна)	60–80	0,30–0,35	160–220
Вітрова (офшорна)	20–30	0,40–0,45	70–100
Разом	150–200		315–440

Джерело: розроблено авторами.

Для оцінки перспектив виробництва водню в табл. 11 представлено три сценарії: базовий, помірний та інтенсивний.

Таблиця 11 – Сценарії виробництва зеленого водню в Україні

Показник	Базовий сценарій	Помірний сценарій	Інтенсивний сценарій
Потужність електролізерів, ГВт	30	50	80
Споживання електроенергії, ТВт·год/рік	150	250	400
Виробництво водню, млн т/рік	3,0	5,0	8,0
Частка експорту, %	70	75	75

Джерело: розроблено авторами.

Проте успіх буде залежати від комплексної державної політики та підтримки інвестицій у відповідну інфраструктуру та технологій, що відповідають європейським стандартам.

Картосхема газотранспортної системи України представлена на рис. 5.

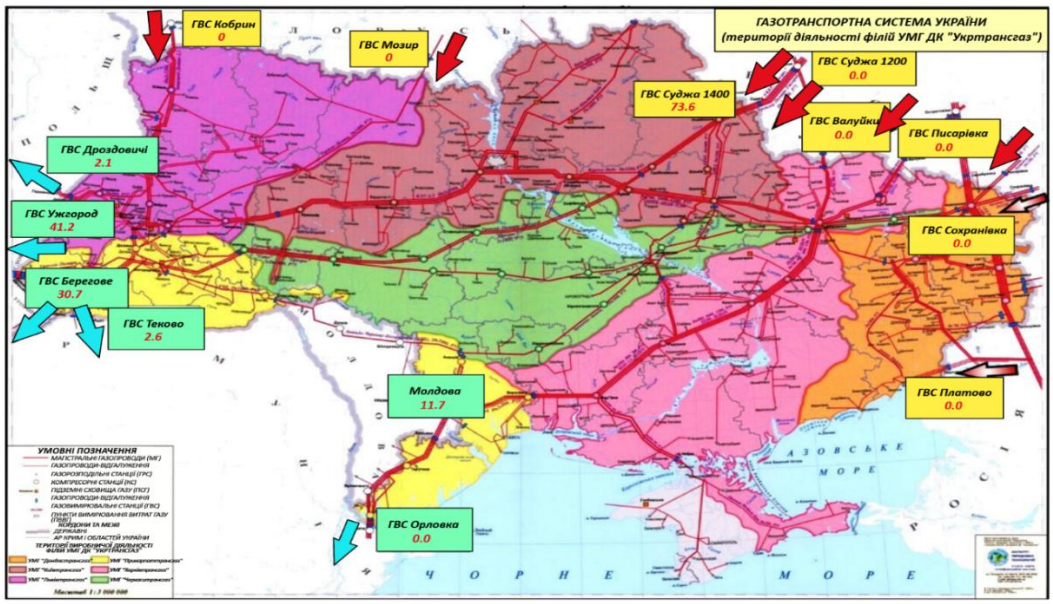


Рис. 5. Картосхема газотранспортної системи України [15]

Загальна технічна характеристика ГТС України представлена в табл. 12.

Протяжність газотранспортної системи України перевищує 38 тис. км**,** а активний обсяг підземних сховищ становить понад 30 млрд м³**,** що еквівалентно приблизно 2,7 млн т водню у разі переобладнання під його зберігання. Ці показники підтверджують статус України як стратегічного водневого хабу Європи.

Таблиця 12 – Загальна технічна характеристика ГТС України [15]

Довжина газопроводів	*38,9 тис. км*
Довжина магістральних трубопроводів	*22,2 тис. км*
Пропускна здатність на вході	*288 млрд куб. м на рік*
Пропускна здатність на виході	*178,5 млрд куб. м на рік*
Пропускна спроможність на виході до ЄС	*146 млрд куб. м на рік*
Кількість газотранспортних одиниць	*702 шт.*
Кількість компресорних станцій	*72 шт.*
Електрична потужність компресорних станцій	*5448,0 МВт*

Завдяки своїй географії та інфраструктурі, роль транзитного вузла реалізовуватиметься за напрямками, представленими на рис. 6.

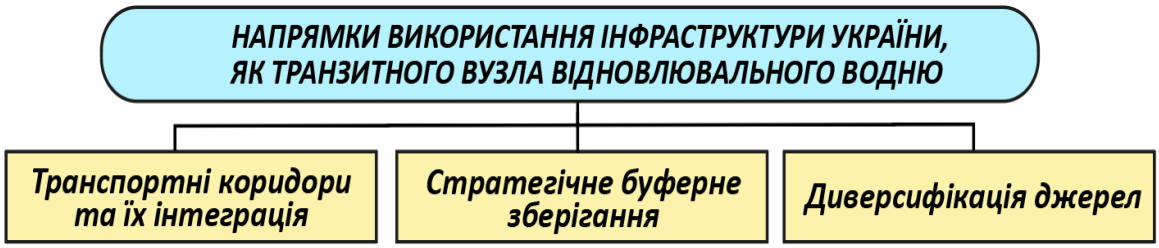


Рис. 6. Напрямки використання інфраструктури України як транзитного вузла відновлювального водню [15]

1. Транспортні коридори та їх інтеграція. Україна офіційно включена до карти European Hydrogen Backbone (EHB). Це означає інтеграцію наших магістральних газопроводів до єдиної мережі, яка дозволить перекачувати водень з Південно-Східної Європи (зокрема, потенційного виробництва в Румунії та Болгарії) до Німеччини.

Крім того, технічно можливими вважаються такі варіанти:

– транспортування воднево-метанових сумішей (Blending) з концентрацією H_2 до 20 %;

– створення окремих водневих магістралей у межах міжнародних коридорів.

Як відомо, у межах європейської водневої інфраструктури ідентифіковано три основні трубопровідні коридори (північноморський, середземноморський та східний (український), кожен з яких відіграє ключову роль у забезпеченні безперервності та надійності ланцюгів постачання водню в Європі (рис. 7).

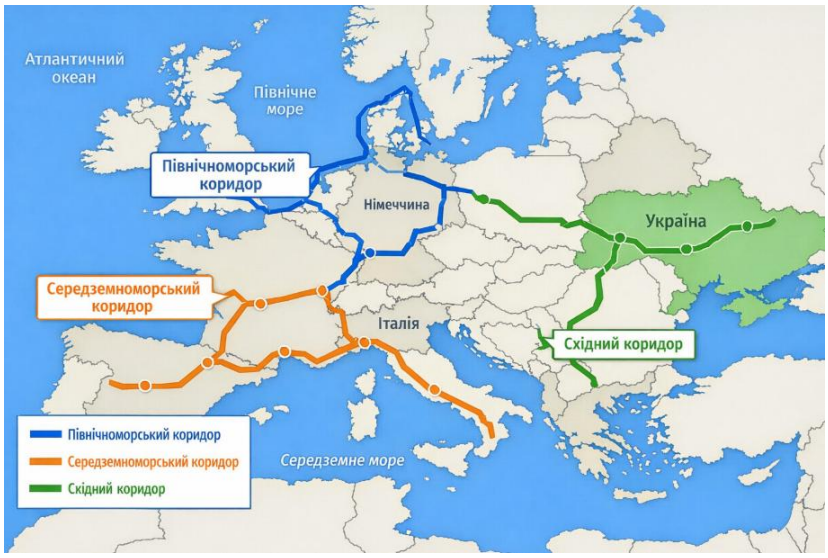


Рис. 7. Коридори постачання водню в Європу [15]

Наявність розгалуженої мережі розподільних і магістральних трубопроводів у країнах Європи і в Україні загальною протяжністю 2,7 млн км, є важливим фактором формування єдиного європейського водневого ринку та зниження капітальних витрат на створення нової інфраструктури, за даними [18] представлена на рис. 8.

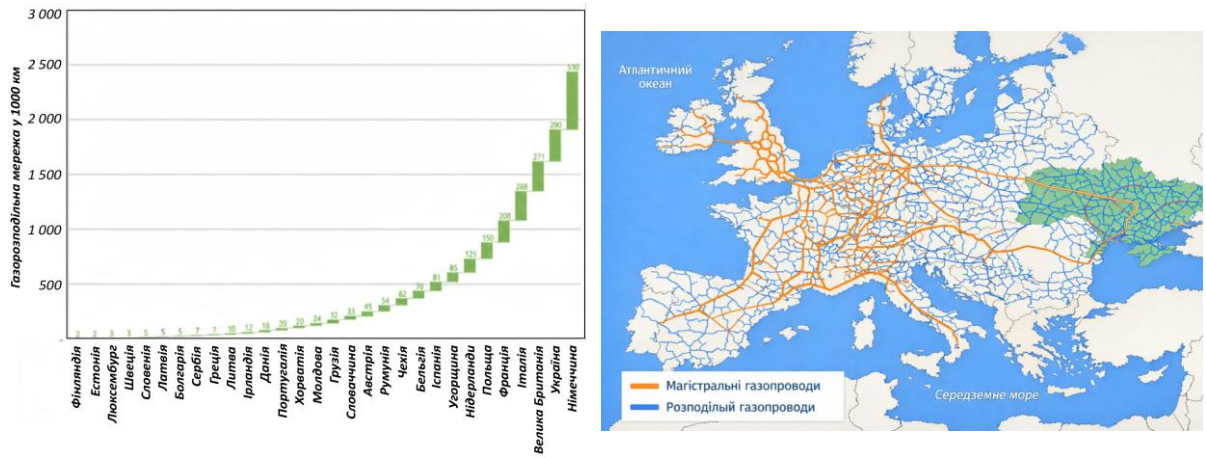


Рис. 8. Наявність розподільних і магістральних газових трубопроводів в Європі
Джерело: https://www.entsog.eu/sites/default/files/2023-01/ENTSOG_GIE_SYSDEV_2021-2022_1600x1200_FULL_240_clean.pdf.

У післявоєнний період Україна має реальні передумови відігравати не лише роль стратегічного транзитного вузла, а й бути значним виробником зеленого водню на європейському ринку. За оцінками Міжнародного енергетичного агентства (IEA), технічний потенціал виробництва водню з відновлюваної енергії (сонячної та вітрової) становить

приблизно 18–38 млн тонн на рік, що відповідає величезному обсягу низьковуглецевого водню для внутрішнього використання та експорту. Цей потенціал базується на 1 300–2 300 ТВт·год/рік технічного потенціалу ВДЕ, який є більшим, ніж поточний обсяг електричної генерації до війни, і дозволяє реалізувати масштабні електролізні проєкти.

За сценаріями розвитку, якими оперує IEA**,** проєкти виробництва близько 2,5 млн тонн водню на рік (Mtpa) можуть приносити щорічні доходи близько 18–22 млрд дол. США за рахунок як експорту водню, так і суміжних продуктів (наприклад, зеленої сталі), залежно від структури продажу і використання частини водню для внутрішнього виробництва сталі чи інших продуктів. Частина цих доходів від самого експорту водню в ЄС може становити близько 3-5 млрд дол. щороку за очікуваних цін на рівні приблизно 3–4 дол. США за кг H_2.

Деякі оцінки подають ще більші значення: за іншими розрахунками, загальний потенціал виробництва зеленого водню в Україні може досягати майже 45 млн тонн на рік за повного використання доступних ресурсів і відповідної інфраструктури. Такі кількісні показники свідчать про те, що Україна може стати високопродуктивним виробником та потенційним експортером зеленого водню, а не лише транзитним хабом, за умови побудови достатніх електролізних потужностей та інтеграції до європейських ринків.

Ці прогнози узгоджуються із загальною тенденцією росту попиту на водень у Європі: загальний глобальний попит може досягти 430 млн тонн до 2050 року**,** з яких велика частина припадатиме на зелені джерела, а ЄС планує розширення електролізерних потужностей до 40 ГВт до 2030 року у рамках ініціативи 2×40 ГВт.

Крім того, в України є всі підстави стати енергетичним мостом**,** який з’єднає Каспійський регіон та країни Близького Сходу з промисловим серцем Європи.

Схема можливих маршрутів транспортування водню з України до ЄС представлені на рис. 9.

Рис. 9. Схема маршрутів транспортування водню з України до ЄС [14; 15].

Потенційні можливості транспортування водню з України за даними [18] представлені на рис. 10.

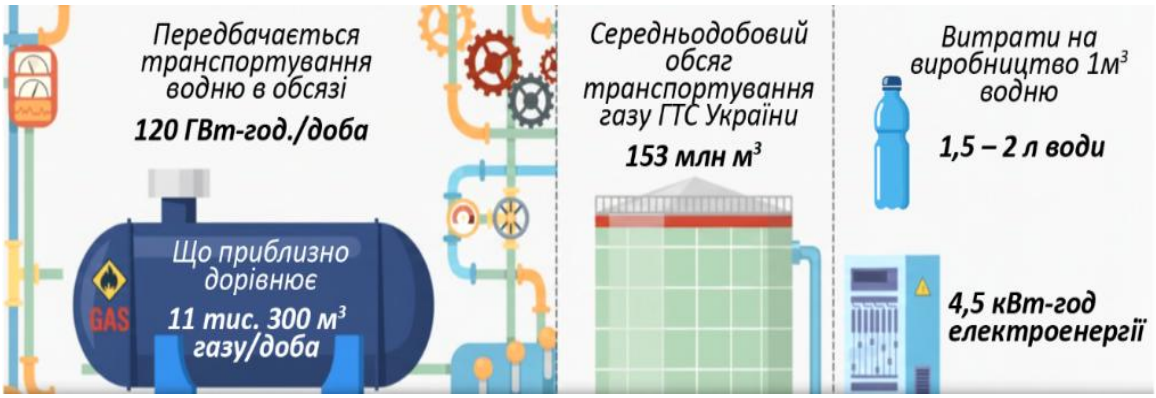


Рис. 10. Потенційні можливості транспортування водню з України [18]

Можливості виробництва водню по областях та регіонах України за даними [18] представлені на рис. 11.

Рис. 11. Потенційні можливості виробництва водню по областях та регіонах України [18]

2. Стратегічне буферне зберігання

Підземні сховища природного газу України місткістю становлять близько 30 млрд м³ є ключовими для стабілізації всього європейського водневого ринку.

Транзитний сервіс: Україна може пропонувати послугу «транзит + сезонне зберігання». Це дозволить європейським споживачам накопичувати водень влітку (коли сонячна генерація пікова) і отримувати його взимку.

Балансування мережі: Без українських сховищ європейській мережі ЕНВ буде вкрай важко підтримувати стабільний тиск при зростанні попиту.

3. Диверсифікація джерел

Україна може приймати водень, вироблений у Чорноморському регіоні (офшорна вітроенергетика), та спрямовувати його через Центральноєвропейський водневий коридор**.** Це може перетворити ГТС України на масштабну базу відновлюваних джерел, яка використовує лінії постійного струму надвисокої напруги (ПСНВН) для передачі чистої енергії електроенергії («Huawei»). Для реалізації цієї ролі необхідно забезпечити сертифікацію походження водню (Guarantees of Origin), щоб транзитний ресурс відповідав екологічним стандартам ЄС.

Крім того, навіть за наявності значного потенціалу та базових інфраструктурних передумов становлення водневої галузі неможливе без наявного фінансування, масштабних інвестицій, стабільного та передбачуваного бізнес-середовища, а також активного міжнародного партнерства [21].

При цьому цілі, потенціал, необхідні умови, ключові сфери застосування, поточні виклики переходу на водневу технологію в Україні представлені в табл. 13.

Таблиця 13 – Цілі, потенціал, необхідні умови, ключові сфери застосування, поточні виклики переходу на водневу технологію в Україні

Цілі	*Україна має на меті стати значним гравцем на водному ринку, зменшуючи залежність від імпорту та сприяючи декарбонізації*
Потенціал	*Територія України може стати джерелом водню для власного споживання та експорту до ЄС, з можливим використанням газопроводів та газосховищ для транспортування.*
Необхідні умови	*Гармонізоване з європейськими нормами законодавство та прозорі процедури для отримання дозволів*
	Стимулювання інвестицій у технології та інфраструктуру, включно з електролізерами потужністю до 10 ГВт до 2030 року
	Розвиток транспортування (наприклад, через газопровід "Прогрес") та зберігання (у підземних сховищах)
Ключові сфери застосування	*Виробництво зеленого аміаку для агросектору, декарбонізація енергетики та промисловості, транспорт*
Поточні виклики	*Вартість виробництва залишається високою, що призводить до перегляду деяких проєктів*
Стратегічні кроки	*Підписання Україною угод про співпрацю (наприклад, з Європейським енергетичним співтовариством)*
	Участь компаній («Нафтогаз», «Укртрансгаз») у міжнародних ініціативах, таких як «H2EU+Store»

Джерело: розроблено авторами.

Для того щоб українська ГТС стала повноцінною частиною європейського ринку, водень, що транспортується, має відповідати жорстким критеріям Директиви ЄС про відновлювані джерела енергії (RED II/III), представлених в табл. 14.

Технічні та правові критерії транспортування водню з України до країн ЄС. Розвиток водневої енергетики в Україні та її інтеграція до європейського енергетичного простору обумовлюють необхідність формування ефективної системи транспортування водню до країн Європейського Союзу. При цьому ключове значення мають технічні можливості існуючої та перспективної інфраструктури, а також відповідність правових і регуляторних механізмів вимогам законодавства ЄС.

Таблиця 14 – Критерії Директиви ЄС про відновлювані джерела енергії (RED II/III) [19]

Порогове значення викидів (Carbon Threshold)	Щоб водень вважався «зеленим» (RFNBO – відновлюване паливо небіологічного походження), він повинен забезпечувати скорочення викидів парникових газів щонайменше на 70% порівняно з викопним паливом.
	Весь життєвий цикл (виробництво + компресія для транзиту + втрати в трубах) має вкладатися в ліміт 3.38 кг CO_2/eq кг H_2.
	Важливо, щоб компресорні станції на маршруті транзиту водню працювали на електриці з ВДЕ або на самому водні, інакше "вуглецевий слід" під час транспортування перевищить норму.
Принцип «Додатковості» (Additionality)	Електроенергія для виробництва водню повинна братись з нових потужностей ВДЕ.
	Не можна використовувати старі ГЕС чи АЕС для виробництва транзитного водню, якщо передбачається його сертифікація за стандартами Європейської Комісії як RFNBO. *Примітка*. Якщо в енергосистемі частка ВДЕ перевищує 90%, вимоги до "додатковості" спрощуються.

Закінчення табл. 14

Часова та географічна кореляція	*Часова*: З 2030 року виробництво водню та споживання електрики з ВДЕ мають збігатися з точністю до однієї години. *Географічна*: Електролізер і джерело енергії мають перебувати в одній ціновій зоні або в зоні з аналогічними цінами на мережу. Україна як транзитер має забезпечити технічний облік цих параметрів у режимі реального часу.
Система «Гарантій походження» (Guarantees of Origin – GO)	Оскільки водень у трубі фізично неможливо відрізнити (зелений він чи сірий), то ЄС використовує цифрові сертифікати. Україна повинна впровадити реєстр, сумісний з європейським стандартом EN 16325. При транзиті через підземні сховища газу (ПСГ) сертифікація має враховувати "змішування" ресурсів: якщо ви закачали 1000 т зеленого водню, ви можете викачати лише 1000 т із сертифікатом GO, навіть якщо в сховищі він перемішався з іншим газом.
Технічні стандарти чистоти	Європейські споживачі (особливо транспортний сектор) вимагають водень чистоти 99.9% (згідно з ISO 14687). Транзитна система України повинна гарантувати, що залишки метану чи мастила від компресорів не забруднять ресурс під час перекачування.

Транспортування водню як енергетичного ресурсу суттєво відрізняється від транспортування традиційних енергоносіїв, що зумовлює формування специфічних технічних і юридичних критеріїв.

Технічні критерії транспортування водню. Основним способом транспортування водню на великі відстані розглядається трубопровідна інфраструктура. Водночас використання існуючої газотранспортної системи України для транспортування водню обмежується низкою технічних факторів, серед яких визначальним є явище водневої крихкості металів. Водень здатний проникати у кристалічну структуру сталей, знижуючи їх механічну міцність і підвищуючи ризик утворення тріщин, особливо за умов високого тиску та тривалої експлуатації трубопроводів.

У зв'язку з цим можливість репрофілювання газопроводів для транспортування водню потребує детальної технічної оцінки, що включає аналіз марок сталей, стану зварних з'єднань, проєктного тиску та віку інфраструктури. За оцінками європейських операторів, лише частина магістральних газопроводів може бути адаптована для транспортування водню у чистому вигляді, тоді як інші потребують глибокої реконструкції або заміни.

На перехідному етапі допускається сумішеве транспортування водню разом із природним газом (blending) у межах 5–20 % об'ємної частки водню. Такий підхід дозволяє поступово інтегрувати водень у газову інфраструктуру, однак він має суттєві обмеження, пов'язані зі зниженням теплотворної здатності газу, технічними характеристиками кінцевого обладнання та вимогами безпеки. Крім того, сумішеве транспортування не розглядається Європейським Союзом як повноцінний механізм експорту водню в контексті реалізації водневої стратегії ЄС.

Стратегічною метою є створення окремої водневої трубопровідної інфраструктури, інтегрованої до Європейської водневої магістралі (European Hydrogen Backbone). У цьому контексті Україна розглядається як потенційний учасник транс'європейських водневих коридорів, зокрема через напрямки Україна–Словаччина, Україна–Польща та Україна–Румунія. Реалізація таких проєктів потребує значних інвестицій, розроблення нових технічних стандартів і довгострокового планування розвитку інфраструктури.

Юридичні та регуляторні критерії транспортування водню. Правове регулювання транспортування водню в Європейському Союзі формується в межах оновленого газово-водневого пакета законодавства, який передбачає створення окремого ринку водню та незалежної системи його транспортування. Важливою вимогою є принцип анбандлінгу, тобто відокремлення діяльності з транспортування водню від його виробництва та постачання. Крім того, передбачається недискримінаційний доступ третіх сторін до водневої інфраструктури та запровадження єдиних правил тарифоутворення.

Для експорту водню до ЄС визначальним є не лише факт його транспортування, а й відповідність критеріям сталості. Згідно з вимогами Директиви RED III, водень має бути класифікований як відновлюване паливо небіологічного походження (RFNBO). Це означає, що електроенергія для його виробництва повинна походити з відновлюваних джерел, має бути дотриманий принцип додатковості генерації, а також забезпечене мінімальне скорочення викидів парникових газів на рівні не менше 70 % у порівнянні з викопними видами палива.

Окремим юридичним інструментом підтвердження відповідності водню вимогам ЄС є система гарантій походження. Кожна одиниця експортованого водню повинна супроводжуватися цифровим сертифікатом, що забезпечує простежуваність походження енергії та прозорість ланцюга постачання. Для України це означає необхідність створення національної системи гарантій походження, гармонізованої з європейською системою сертифікації та визнаної інституціями ЄС.

Таким чином, транспортування водню з України до країн Європейського Союзу є комплексним процесом, що потребує одночасного виконання технічних, правових та екологічних критеріїв. Потенціал України як майбутнього експортера водню може бути реалізований лише за умови модернізації інфраструктури, гармонізації національного законодавства з правом ЄС та впровадження повноцінної системи сертифікації сталості водню. Врахування зазначених критеріїв є передумовою інтеграції України до європейського водневого ринку та підвищення її ролі у формуванні безвуглецевої енергетичної системи Європи.

Кроки, які зробила Україна на шляху до формування національної водневої стратегії представлені в табл. 15.

Війна відкинула нашу країну за різними оцінками на кілька десятиліть назад у своєму розвитку, тому Україна повинна рухатись значно швидше та будувати нову економіку відповідно до європейських стандартів [25].

Враховуючи наявність унікальної газотранспортної мережі, в Україні є всі можливості стати виробничим і транспортним хабом водню в ЄС. Модернізація наявної газової мережі має багато переваг, оскільки зменшує вплив на навколишнє середовище, прискорює процес одержання дозволів та зменшує витрати.

Крім того, Україна має значні водні ресурси, та високий сонячний та вітровий потенціал, що є необхідними умовами для виробництва зеленого водню.

Таблиця 15 – Кроки України на шляху до формування національної водневої стратегії [4]

Категорія	Опис ініціативи / проєкту
Ініціативи ЄС	Воднева стратегія для кліматично нейтральної Європи від 8 липня 2020 року, де Україна визначена як пріоритетний партнер
	Ініціатива 2×40 ГВт, згідно з якою Україна матиме 8000 МВт електролізних потужностей для зеленого водню та 1800 МВт для аміаку до 2030 року
	Звіт про інвестиції та підтримку зеленого водню, згідно з яким Україні потрібні інвестиції в розмірі 20,1 млрд євро для будівництва потужностей для електролізера потужністю 10 000 МВт
Національні ініціативи	Концепція водневої енергетики України до 2030 року — у розробці Міністерства енергетики
	H2U — Hydrogen Initiative Ukraine-Germany — міжнародна ініціатива з розбудови експортного потенціалу
	Воднева економіка України — стратегічний документ, узгоджений із Зеленим курсом ЄС
Пілотні проєкти	Rengy Hydrogen (Одещина): пілотний проєкт з виробництва H_2 із сонячної енергії
	Електролізери в Миколаївській області — у співпраці з Siemens Energy
	Проєкт із транспортування водню до ЄС через трубопроводи «Укртрансгазу»
	Прикордонний завод з виробництва водню в Західній Україні
	Центрально-європейський водневий коридор (Central European Hydrogen Corridor, CEHC) (будівництво трубопроводу)
	H2EU+Store (виробництво водню; транспортування; інтегрована інфраструктура та зберігання)
	Водневий вітровий та сонячний парк
	KyivH2BUS. Впровадження водню на наземному дорожньому транспорті

Потенціал виробництва водню представлений у табл. 16.

Таблиця 16 – Потенціал виробництва водню

Напрямок / Перевага	**Детальний опис та очікувані результати**
Зменшення залежності України від імпорту енергетичних ресурсів	Енергетична незалежність дозволить суттєво поліпшити стан платіжного балансу країни через зменшення імпорту.
Демонополізація виробництва та розподілу електроенергії в країні	Виникнення конкуренції, збільшення інвестицій у розвиток і реконструкцію існуючої інфраструктури, підрив монопольних позицій українських фінансово-промислових груп на енергетичному ринку, зменшення рівня цін на ринку.
Підвищення збалансованості в роботі енергетичної системи	Підвищення стабільності, зменшення дисбалансу: профіцит енергії влітку або вдень, коли на повну потужність працюють сонячні та вітроелектростанції. Як наслідок, виникає необхідність відключати від енергосистеми атомні станції та гідроелектростанції, що призводить до неефективного використання потужностей і до підвищення собівартості виробництва електроенергії. У такій ситуації виробництво «зеленого» водню може стати перспективним напрямом балансування потужностей в енергосистемі та способом накопичення і зберігання електроенергії в періоди її профіциту.
Можливість змінити роль газотранспортної системи України для європейського енергетичного ринку	Дослідження, які проведені за кордоном і в Україні, засвідчили, що «зелений» водень можна додавати до природного газу та транспортувати його наявними трубопроводами.
Унеможливлення корупції при обчисленні паливної складової в собівартості електроенергії	Покращення інвестиційного клімату.
Зменшення шкідливих викидів у НПС	Покращення екологічного стану НПС.
Створення нової експортної галузі за фінансової, технологічної підтримки ЄС та створення підтримуючих галузей, реконструкція енергетичної інфраструктури в Україні	Передбачається встановлення 10 ГВт потужностей вітро- та сонячних електростанцій, з яких 7,5 ГВт вироблятиме «зелений» водень для потреб ЄС.
Створення внутрішнього ринку водню за допомогою ЄС	Згідно зі стратегією «Green Hydrogen for a European Green Deal A 2x40 GW Initiative» ЄС готовий надати допомогу в розвитку внутрішнього ринку виробництва, зберігання та використання водню (передбачається встановлення 2,5 ГВт потужностей вітро- та сонячних електростанцій для потреб внутрішнього ринку).
Створення нових робочих місць	Згідно з розрахунками міжнародних організацій, зокрема Global Wind Energy Council, 1 млн дол. США, які витрачені на створення відновлювальних джерел енергії, створює 7,49 постійних робочих місць, що в 3 рази більше порівняно з традиційною енергетикою — 2,66 робочих місця. Розрахунки, проведені в рамках ініціативи ЄС «Green Hydrogen for a European Green Deal A 2x40 GW Initiative», також передбачають створення нових робочих місць для обслуговування електролізів, електростанцій і необхідної інфраструктури.

Джерело: розроблено авторами.

Перспективи впровадження водневих технологій в Україні представлені в табл. 17.

Таблиця 17 – Перспективи застосування водневих технологій в Україні

Декарбонізація важкої промисловості	*Водень має вирішальне значення для галузей, які важко піддаються декарбонізації, таких як металургія та дальні перевезення (вантажів та пасажирів) авто- та авіаційним транспортом.*
Інфраструктура	*Існуючі газопроводи потенційно можуть транспортувати водень, зменшуючи витрати на нову енергетичну інфраструктуру*
Технологічний процес	*Зосередження уваги на підвищенні ефективності виробництва і зменшенням витрат є шляхом до реалізації повного потенціалу водню, як наріжного каменю стійкої енергетичної системи.*

Джерело: розроблено авторами.

Висновки. Україна володіє значним технічним потенціалом виробництва зеленого водню, що базується на великих ресурсах сонячної та вітрової енергії, особливо у південних і східних регіонах країни. За сучасними оцінками, обсяги можливого виробництва можуть сягати 18–38 млн тонн водню на рік, що створює передумови для формування конкурентоспроможного водневого сектору.

Вигідне географічне положення України та наявність розгалуженої газотранспортної інфраструктури забезпечують можливість її трансформації з традиційного транзитного енергетичного вузла у виробничо-експортний центр зеленого водню для ринків Європейського Союзу.

Прогнозні сценарії розвитку водневої енергетики свідчать, що вже у середньо- та довгостроковій перспективі Україна може експортувати до кількох мільйонів тонн водню щорічно, забезпечуючи мільярдні валютні надходження та сприяючи інтеграції у європейський ринок низьковуглецевої енергії.

Реалізація водневого потенціалу України є можливою за умови масштабного впровадження відновлюваних джерел енергії, розвитку електролізних технологій, модернізації енергетичної інфраструктури та гармонізації національного законодавства з європейськими нормами у сфері кліматичної та енергетичної політики.

У післявоєнний період розвиток водневої енергетики може стати одним із ключових драйверів сталого відновлення економіки України, сприяючи декарбонізації промисловості, підвищенню енергетичної безпеки та формуванню нових конкурентних переваг держави на міжнародному рівні.

Список використаних джерел

1. World Health Organization. (2023). *Air pollution.* WHO. https://www.who.int.

2. European Environment Agency. (2023). *Air quality in Europe — 2023 report.* EEA. https://www.eea.europa.eu.

3. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis report.* IPCC. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/.

4. United Nations Environment Programm. (2023). *Emissions Gap Report 2023.* UNEP. https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2023.

5. International Energy Agency. (2021). *Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector.* IEA. https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050.

6. Dawood, F., Anda, M., & Shafiullah, G. (2020). Hydrogen production for energy: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy, 45*(7), 3847–3869. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.059.

7. International Energy Agency. (2019). *The future of hydrogen.* IEA. https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen.

8. Victor, D. G., Geels, F. W., & Sharpe, S. (2019). Accelerating the low carbon transition. *Energy Policy, 130,* 1–8. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.01.002.

9. Коваленко, В. С., & Лисенко, О. М. (2021). Сучасні водневі технології в енергетиці. *Енергетика: економіка, технології, екологія,* (3), 10–18.

10. Бондаренко, О. В. (2020). Аналіз технологій отримання водню та перспективи розвитку водневої енергетики в Україні. *Вісник НТУ «ХПІ»,* (2), 15–22.

11. Шевченко, І. В., & Петренко, О. А. (2019). Перспективи використання водню в енергетичній системі України. *Наукові праці НУХТ, 25*(6), 45–52.

12. European Commission. (2019). *The European Green Deal.* https://commission.europa.eu.

13. European Commission. (2021). *Fit for 55: Delivering the EU's 2030 climate target.* https://commission.europa.eu.

14. Кабінет Міністрів України. (2021). *Стратегія екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату на період до 2030 року*. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1363-2021-%D1%80.

15. Міністерство енергетики України. (2023). *Енергетична стратегія України на період до 2050 року.* Київ.

16. Shabani, B., & Andrews, J. (2015). Hydrogen and fuel cells. In *Energy sustainability through green energy* (pp. 453–491). Springer. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2337-5_20.

17. Кудря, С. О. (2020). *Відновлювані джерела енергії.* Інститут відновлюваної енергетики НАН України.

18. Turner, J. A. (2004). Sustainable hydrogen production. *Science, 305*(5686), 972–974. https://doi.org/10.1126/science.1103197

19. Бойченко, С. В. (2018). *Енергетика майбутнього: водневі технології.* Наукова думка.

20. Larminie, J., & Dicks, A. (2003). *Fuel cell systems explained* (2nd ed.). Wiley.

21. Dunn, S. (2002). Hydrogen futures: Toward a sustainable energy system. *International Journal of Hydrogen Energy,* 27(3), 235–264. https://doi.org/10.1016/S0360-3199(01)00131-8

22. Вернадський, В. І. (2004). *Хімічна будова біосфери Землі*. Наукова думка.

23. Кабата-Пендіас, А., & Пендіас, Х. (2010). *Геохімія слідів елементів у ґрунтах і рослинах.* Либідь.

24. Greenwood, N. N., & Earnshaw, A. (1997). *Chemistry of the elements* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.

25. Mason, B., & Moore, C. B. (1982). *Principles of geochemistry* (4th ed.). Wiley.

26. Kharel, S., & Shabani, B. (2018). Hydrogen is a long-term large-scale energy storage solution to support renewables. *Energies,*11(10), 2825. https://doi.org/10.3390/en11102825.

27. International Renewable Energy Agency. (2020). *Green hydrogen: A guide to policy making.* IRENA. https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Green-hydrogen.

28. Tröndle, T., Usher, W., Thurner, T., Staffell, I., & Gruber, G. (2020). *Spatially explicit analysis of the global technical potential of green hydrogen. Nature Energy, 5,* 764–775. https://doi.org/10.1038/s41560-020-00780-7.

29. Jacobson, M. Z., et al. (2017). 100% clean and renewable wind, water, and sunlight energy. *Energy & Environmental Science,* 10, 1775–1800. https://doi.org/10.1039/C6EE01283J.

30. European Commission. (2020). *EU hydrogen strategy under the European Green Deal.* https://ipcei.observatory.clean-hydrogen.europa.eu.

31. Світовий банк. (2023). *Водень як шлях до декарбонізації: роль країн з перехідною економікою.* Washington, DC.

32. Slovo і Dilo. (2021, October 5). *Виробництво та експорт водню: які області України мають найбільший потенціал.* https://www.slovoidilo.ua.

33. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. (n.d.). *Потенціал відновлюваної енергетики*. https://old.saee.gov.ua.

34. NASA. (n.d.). *Global warming.* https://science.nasa.gov/earth/climate-change/global-warming/.

References

1. World Health Organization. (2023). *Air pollution.* WHO. https://www.who.int.

2. European Environment Agency. (2023). *Air quality in Europe — 2023 report.* EEA. https://www.eea.europa.eu.

3. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis report.* IPCC. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/.

4. United Nations Environment Programm. (2023). *Emissions Gap Report 2023.* UNEP. https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2023.

5. International Energy Agency. (2021). *Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector.* IEA. https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050.

6. Dawood, F., Anda, M., & Shafiullah, G. (2020). Hydrogen production for energy: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy, 45*(7), 3847–3869. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.059.

7. International Energy Agency. (2019). *The future of hydrogen.* IEA. https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen.

8. Victor, D. G., Geels, F. W., & Sharpe, S. (2019). Accelerating the low carbon transition. *Energy Policy, 130,* 1–8. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.01.002.

9. Kovalenko, V. S., & Lysenko, O. M. (2021). Suchasni vodnevi tekhnolohii v enerhetytsi. [Modern hydrogen technologies in the energy sector]. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia – Energy: economics, technology, the environment* (3), 10–18.

10. Bondarenko, O. V. (2020). Analiz tekhnolohii otrymannia vodniu ta perspektyvy rozvytku vodnevoi enerhetyky v Ukraini. [An analysis of hydrogen production technologies and the prospects for the development of the hydrogen energy sector in Ukraine]. *Journal of the National Technivcal University "Charkiv Polytechnics",* (2), 15–22.

11. Shevchenko, I. V., & Petrenko, O. A. (2019). Perspektyvy vykorystannia vodniu v enerhetychnii systemi Ukrainy [The prospects for the use of hydrogen in Ukraine's energy system]. *Scientific papers of the NUHT, 25*(6), 45–52.

12. European Commission. (2019). *The European Green Deal.* https://commission.europa.eu.

13. European Commission. (2021). *Fit for 55: Delivering the EU's 2030 climate target.* https://commission.europa.eu.

14. Cabinet of the Ministers of Ukraine. (2021). Stratehiia ekolohichnoi bezpeky ta adaptatsii do zminy klimatu na period do 2030 roku [Strategy for Environmental Safety and Adaptation to Climate Change for the period up to 2030]. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1363-2021-%D1%80.

15. Ministry of Energy of Ukraine. (2023). Enerhetychna stratehiia Ukrainy na period do 2050 roku [Ukraine's Energy Strategy for the period up to 2050].

16. Shabani, B., & Andrews, J. (2015). Hydrogen and fuel cells. In *Energy sustainability through green energy* (pp. 453–491). Springer. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2337-5_20.

17. Kudria C. O. (2020). Vidnovliuvani dzherela enerhii. [Renewable energy sources.] *Instytut vidnovliuvanoi enerhetyky NAN Ukrainy. - Institute of Renewable Energy, National Academy of Sciences of Ukraine.*

18. Turner, J. A. (2004). Sustainable hydrogen production. *Science, 305*(5686), 972–974. https://doi.org/10.1126/science.1103197.

19. Boichenko, S. V. (2018). Enerhetyka maibutnoho: vodnevi tekhnolohii. [The energy of the future: hydrogen technologies]. *Naukova dumka – Scientific thought.*

20. Larminie, J., & Dicks, A. (2003). *Fuel cell systems explained* (2nd ed.). Wiley.

21. Dunn, S. (2002). Hydrogen futures: Toward a sustainable energy system. *International Journal of Hydrogen Energy,* 27(3), 235–264. https://doi.org/10.1016/S0360-3199(01)00131-8.

22. Vernadskyi, V. I. (2004). Khimichna budova biosfery Zemli. - The chemical composition of Earth's biosphere. *Naukova dumka – Scientific thought.*

23. Kabata - Pendias, A., & Pendias, H. (2010). *Heokhimiia slidiv elementiv u gruntakh i roslynakh [The geochemistry of trace elements in soils and plants]*. Lybid.

24. Greenwood, N. N., & Earnshaw, A. (1997). *Chemistry of the elements* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.

25. Mason, B., & Moore, C. B. (1982). *Principles of geochemistry* (4th ed.). Wiley.

26. Kharel, S., & Shabani, B. (2018). Hydrogen is a long-term large-scale energy storage solution to support renewables. *Energies,*11(10), 2825. https://doi.org/10.3390/en11102825.

27. International Renewable Energy Agency. (2020). *Green hydrogen: A guide to policy making.* IRENA. https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Green-hydrogen.

28. Tröndle, T., Usher, W., Thurner, T., Staffell, I., & Gruber, G. (2020). *Spatially explicit analysis of the global technical potential of green hydrogen. Nature Energy, 5,* 764–775. https://doi.org/10.1038/s41560-020-00780-7.

29. Jacobson, M. Z., et al. (2017). 100% clean and renewable wind, water, and sunlight energy. *Energy & Environmental Science*, 10, 1775–1800. https://doi.org/10.1039/C6EE01283J

30. European Commission. (2020). *EU hydrogen strategy under the European Green Deal.* https://ipcei.observatory.clean-hydrogen.europa.eu.

31. Svitovyi bank [World Bank]. (2023). *Voden yak shliakh do dekarbonizatsii: rol krain z perekhidnoiu ekonomikoiu [Hydrogen as a Path to Decarbonization: The Role of Transition Economies]*. Washington, DC.

32. Slovo i Dilo. (2021, October 5). *Vyrobnytstvo ta eksport vodniu:yaki oblasti Ukrainy maiut naibilshyi potentsial [Hydrogen Production and Export: Which Regions of Ukraine Have the Greatest Potential]*. https://www.slovoidilo.ua.

33. Derzhavne ahentstvo z enerhoefektyvnosti ta enerhozberezhennia Ukrainy [State Agency for Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine]. (n.d.). *Potentsial vidnovliuvanoi enerhetyky – The potential of renewable energy*. https://old.saee.gov.ua.

34. NASA. (n.d.). *Global warming*. https://science.nasa.gov/earth/climate-change/global-warming/

Дата першого надходження статті до видання: 12.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 09.01.2026

UDC 620.92

Vitaliy Zatserkovny[1], Oleksandr Vasyliev [2]

[1] Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Geoinformatics
Taras Shevchenko National University (Kyiv, Ukraine)
E-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0003-5187-6125. **ScopusID:** 57200165109

[2] graduate student 2-nd year of study, specialty 193 – Geodesy and Land Management of the Department of Geoinformatics
Taras Shevchenko National University (Kyiv, Ukraine)
E-mail: vasilyeva455@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0009-2177-7859

ASSESSING THE PROSPECTS FOR HYDROGEN ENERGY DEVELOPMENT IN UKRAINE

The development of the global energy sector based on fossil fuels leads to a significant increase in the concentration of carbon dioxide (CO_2) and other harmful substances in the atmosphere, causing negative impacts on natural ecosystems as well as human and animal health. The second major energy-related problem is associated with the influence of fossil fuels on global climate change, which manifests itself in rising average temperatures, an increasing frequency of extreme weather events, and the degradation of natural resources. The third problem is linked to the escalation of geopolitical conflicts driven by price volatility in global energy markets and the growing vulnerability of many countries due to their dependence on imported fuels. Therefore, the transformation of the energy sector towards the use of renewable energy sources (RES) and hydrogen energy is considered a key instrument for reducing negative environmental impacts, protecting public health, mitigating climate risks, and ensuring energy security for many countries worldwide.

Renewable energy sources (solar, wind, hydropower, and bioenergy) enable electricity generation with minimal or zero greenhouse gas emissions. Their large-scale deployment contributes to reducing dependence on fossil fuels and enhances the energy security and stability of national energy systems. However, renewable energy alone cannot ensure a continuous supply of the required amount of energy on a daily, seasonal, or annual basis.

Hydrogen energy, in turn, is regarded as a key element for integrating renewable energy sources into the energy system due to its ability to accumulate and store surplus "green" electricity during periods of excess generation and to utilize it during shortages. The synergy between renewable energy sources and hydrogen energy forms the foundation for building a climate-neutral energy system of the future, serving as one of the core instruments for decarbonizing the entire economy and a necessary condition for achieving carbon neutrality.

Hydrogen, due to its high energy conversion efficiency, is a promising energy carrier. The high efficiency of hydrogen technologies determines their significant potential in modern energy systems.

For Ukraine, hydrogen opens new opportunities, including the development of modern energy infrastructure, attraction of investments, job creation, strengthening of export potential, and integration into the European energy space. Moreover, the use of green hydrogen produced through electrolysis powered by renewable energy sources enables the decarbonization of economic sectors where direct electrification is technically or economically challenging.

Keywords: *fossil fuels; renewable energy sources; hydrogen energy; hydrogen; carbon neutrality; energy efficiency.*
Fig.: 17. Table: 17. References: 34.

Зацерковний В. І., Васильєв О. М. Оцінка перспектив розвитку водневої енергетики в Україні. *Технічні науки та технології*, 2026. № 1(43). С. 355-381. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-355-381.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-382-390
УДК 332.36:502.131.1

Владислав Анатолійович Смілка

доктор технічних наук, професор, професор кафедри теорії архітектури і архітектурного проєктування
Київський національний університет будівництва і архітектури (Україна, м. Київ)
E-mail: smilka.va@knuba.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-7025-9398,
ResearcherID: NYT-3033-2025. **Scopus Author ID:** 57211859251

ПЕРЕХІД ВІД СТАЛОГО ДО ВІДПОВІДАЛЬНОГО ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯ

У статті розкрито сутність восьми принципів управління земельними ресурсами – відстежуваність, стійкість, впізнаваність, відкритість, відновлюваність, авторитетність, рефлексивність, надійність, які позиціонуються як операційна та аналітична основи для відповідального землекористування на основі концепції життєво орієнтованого управління. Кожен з принципів має системи оцінювання, щодо відповідності рішення заявленій меті та врахування нагальних потреб територіальної громади. У роботі визначено напрями та завдання подальших досліджень для впровадження підходів відповідального землекористування.

Ключові слова: *землекористування; сталий розвиток; відповідальне управління; принципи; зміна клімату; моніторинг.*

Рис.: 1. Табл.: 1. Бібл.: 17.

Актуальність теми дослідження. Система оцінювання сталості розвитку населених пунктів відіграє ключову роль як механізм вимірювання успіху на шляху до реалізації Глобальних цілей сталого розвитку. Показники сталого розвитку дозволяють об'єктивно визначити результативність стратегій, спрямованих на покращення рівня життя мешканців, охорону природи та земель. Застосування таких показників дає змогу місцевим органам не лише оцінювати вже досягнуті результати, а й оперативно вносити зміни до своїх стратегічних планів, комплексних планів розвитку громад у відповідь на поточні проблеми. Значущість цих індикаторів полягає в тому, що вони забезпечують комплексний погляд на всі сфери розвитку населених пунктів об'єднуючи соціальні, екологічні, економічні та технологічні аспекти [1]. Показники сталого розвитку є загальними, вони не впливають на конкретну людину, а є основою для регулювання різних державних політик, галузей економіки. Для оцінювання впливу на конкретну людину розробляються деталізовані показники якості життя.

Відповідно до визначених завдань земельним законодавством України органи державної влади та органи місцевого самоврядування здійснюють діяльність у сфері землеустрою, спрямовану на регулювання відносин для забезпечення сталого землекористування і підвищенню відкритості управлінських рішень.

Постановка проблеми. Управління землями в практичній площині полягає у зміні прав власності на земельні ділянки або режимів використання земель і реалізується через плани просторового розвитку територіальних громад, затвердження землевпорядної та містобудівної документації.

Наслідком трансформації в структурі землекористування є соціально-економічні та біолого-фізичні зміни [2]. Незважаючи на нормативні вимоги до містобудівної чи землевпорядної документації часто залишається не зрозумілим чи достатньо враховують суспільні потреби та вигоди сплановані зміни до землекористування. Насправді багато реалізованих проєктів землевпорядкування не досягають своїх цілей або громадськість не отримує належної користі від їх виконання [3; 4; 5]. Виникає необхідність у розробленні методики оцінювання стратегічних планів розвитку, проєктної документації, які передбачають зміну структури землекористування. Основними критеріями оцінювання мають бути якість життя людини та добробут громади.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У дослідженні [6] вперше представлено розробку загальної методологічної основи для оцінювання управління землекористуванням, яка пізніше отримала назву «8R», що розкривали засади відповідального управління земельними ресурсами на основі восьми принципів. У низці наступних публікацій [7; 8]

© В. А. Смілка, 2026

ця методологія піддалась критиці, зокрема, що не визначено практичну процедуру та індикатори для кожного принципу, щоб встановити чи буде проєкт з управління землею достатньо відповідальним. На сьогодні опубліковані окремі праці щодо практичного використання зазначених принципів [9, 10].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. В зарубіжних наукових публікаціях відмінності між сталим землекористуванням та відповідальним землекористуванням чітко не сформульовані. Разом з тим в українських наукових фахових виданнях питання відповідального землекористування як нової цілісної концепції не розглядались, тому є необхідність дослідити принципи відповідального управління земельними ресурсами в аспекті національного земельного законодавства.

Мета статті розкрити національну специфіку нових принципів управління земельними ресурсами, які позиціонуються як операційна та аналітична основи для відповідального землекористування на основі концепції життєво-орієнтованого управління.

Виклад основного матеріалу. Процес регулювання земельних ресурсів заснований на трьох взаємопов'язаних компонентах – інфраструктурі земельної інформації (технічна складова), системі управління земельними ресурсами (інституційна складова з розгалуженою мережею зв'язків) та земельній політиці (принципи, регламенти, правила, повноваження). Взаємозв'язки між цими компонентами, у вигляді різноманітних операцій, інструментів та даних, розкриваються в концептуальній моделі «права-простір-суб'єкти» [11].

Земля є найважливішим багатством суспільства і розглядається як основний засіб виробництва сільськогосподарської продукції та просторовий базис розміщення та розвитку всіх галузей господарства. Земля цінується за її економічну віддачу та потенціал видобутку ресурсів.

З розвитком суспільства та переосмисленням цінностей значимість земельних ресурсів трансформувалась з суто виробничого призначення до простору для життя – складної соціально-технічної системи, яка охоплює як просторові, так і біотичні виміри. У цій моделі земля розглядається як інтегроване середовище, де соціальні потреби людей, екологічна стабільність та технологічні інновації існують у нерозривній єдності. Управління таким простором базується на підході відповідальності, де пріоритетом стає не миттєвий прибуток, а довгострокове збереження здоров'я екосистем та добробуту громад [8]. Тут кожен механізм орієнтований на підтримку гармонійного співіснування людини та природи. Це динамічна система, що постійно адаптується до нових викликів забезпечуючи етичне ставлення до довкілля як ключову умову виживання та розвитку майбутніх поколінь. Вдосконалення правових та організаційних процедур з регулювання земельних ресурсів залежить від розвитку концепції «земля як об'єкт управління» та від трансформацій парадигм класичного управління [12].

Загальновизнано, що еволюція політик державного управління землями пройшла через три основні стадії: ефективне управління; дотримання положень концепції сталого розвитку; відповідальне управління [9]. Технологічною основою розвитку системи управління є такі складові:

1) побудова фундаментальної системи управління господарськими процесами;

2) формування інфраструктури відкритих масивів даних;

3) прийняття рішень на основі обробки даних та інтелектуальної трансформації, що базується на передових технологіях.

Хоча етапи розвитку державного управління конкретизувались лише в останні десятиліття, вони відображають довгострокове втілення ціннісних пріоритетів управління земельними ресурсами. Ці переходи відбувались стрибкоподібно, під впливом технологічного прориву та інституційних реформам [13]. Кожний етап втілює власну керівну

філософію та основні проблеми, які, у свою чергу, змінюють цілі управління земельними ресурсами та визначають функції та напрямок сучасної практики (табл.).

Таблиця – Еволюція політик землекористування

Політика	Ключова проблема	Мета та завдання	Підхід
Ефективність	Підвищення економічної цінності землі та продуктивності	Розгляд управління як набору завдань з економічного розподілу ресурсів	Лінійний аналіз, встановлення жорстких цільових показників та суворе планування
Сталий розвиток	Просторове управління та інтегрований територіальний розвиток	Створення єдиної структури управління з координацією діяльності всіх сторін	Довгострокові стратегії розвитку, орієнтація на досягнення цілей сталого розвитку
Відповідальність	Інтелектуальне прийняття рішень у динамічному середовищі	Сприйняття управління як нелінійної системи з врахуванням соціальних зміни	Використання інтелектуальних даних, узгодження інтересів усіх учасників процесу та адаптивність

Джерело: [9].

За часів індустріалізації продуктивність сільського господарства та розвиток виробництва визначали статус землі як ключового фактора виробництва. Ефективність управління земельними ресурсами полягала у стимулюванні виробництва та підвищення рівня життя.

Реформи, такі як приватизація землі, перерозподіл ресурсів, політика розвитку та охорони природи вплинули на сферу управління земельними ресурсами. Швидке соціально-економічне зростання вплинуло на усвідомлення цінності землі як еколого-соціального базису. Конференція Організації Об'єднаних Націй з питань навколишнього середовища та розвитку у 1992 році закріпила стале управління земельними ресурсами як глобальний імператив, змістивши акцент з економічного ресурсу на довгострокове управління з врахуванням соціально-екологічних факторів. Період імплементації положень концепції сталого розвитку ознаменувався розвитком нових інструментів – методів екологічного відновлення, методів землевпорядкування та реабілітації, методів комплексної оцінки земель та інтегрованого просторового планування для збалансованого довгострокового розвитку [14]. Розвиток інституту приватної власності в Україні поглибив наше розуміння земельних прав та дав можливість усвідомити значення категорії «суспільні потреби». За парадигмою сталого розвитку завдання управління земельними ресурсами поєднувалися з ширшими соціальними та інституційними цілями, спрямовуючи управління до стратегій комплексного розвитку та активної взаємодії із зацікавленими сторонами.

Сьогодні стрімкий розвиток інформаційних технологій та загострення кліматичних проблем вимагають дедалі тіснішої узгодженості між суб'єктами, що приймають рішення, актуальними даними про землекористування та моніторингом реалізації прийнятих рішень. Ефективність управління земельними ресурсами тепер залежить від моделі відповідального управління. Завдяки цифровізації та інтелектуальним системам, відповідальне управління земельними ресурсами проявляється як оперативне реагування в режимі реального часу на потреби всіх зацікавлених сторін та забезпечення адаптивних заходів землекористування. Відповідальна система управління земельними ресурсами рефлексивно реагує, постійно адаптуючись до динамічних соціальних, економічних та екологічних умов.

Лише за останнє десятиліття зміна клімату досягла рівня безпрецедентних кліматичних аномалій, що потребує переосмислення управління земельними ресурсами в аспекті життєво-орієнтованого управління. Підхід ґрунтується на усвідомленні, що земля є не просто ресурсом, а це жива субстанція, здоров'я та життєздатність якої неподільні з суспільним та приватним благополуччям [15, 16]. Тому раціональність вимагає, щоб інструменти управління – платформи партисипативного управління, показники стійкості, система моніторингу, тощо, в режимі реального часу розглядалися як морально-етичні

компоненти, оцінювані їхньою здатністю пом'якшувати ризики для здоров'я, зберігати біорізноманіття та підтримувати репродуктивні можливості. Переосмислюючи екологічні дані та просторові моделі як інструменти управління життям, біополітика зміщує фокус з ефективності та продуктивності на збереження та покращення самого життя.

Позиціонуючи управління земельними ресурсами як колективну діяльність, необхідну для життєзабезпечення, біополітична проблематика об'єднує державні установи, місцеві громади, неурядові організації та приватних інвесторів навколо спільних цілей. Структура відповідального управління земельними ресурсами спирається на поняття «відповідальний», що свідчить по особливий тип управління землями. Термін «відповідальний» має два значення: 1) стосується орієнтування на отримання бажаних результатів відповідно до людських цінностей при попередньо не сприятливих умовах; 2) особа, яка офіційно наділена повноваженнями щодо прийняття рішення та подальшу діяльність з його реалізації, а також гарантує, що результат рішення не відрізнятиметься від початкових планів. Крім того, важливо мати можливість відстежувати відповідальність, якщо у в процесі реалізації проєкту відбулися зміни або адаптації [17]. Необхідно запровадити дієві механізми зворотного зв'язку, що дозволять зацікавленим особам впливати на управлінські рішення та корегувати їх, забезпечуючи при цьому захист земельних прав і дотримання встановлених режимів та обмежень.

Система відповідального управління земельними ресурсами розроблена для оцінки якості проєктних рішень щодо змін в системі землекористування та/або господарської діяльності та її наслідків на земельних ділянках [6]. Ця система орієнтована на допомогу практикам та органам влади визначити, чи є їхнє проєктне рішення достатньо сталим та ефективним. Термін «відповідальності» часто зустрічається в багатьох публікаціях, пов'язаних із земельними ресурсами, але не є конкретним, практичним та вимірюваним. Нові підходи відповідального управління земельними ресурсами сформували понятійно-термінологічну базу «відповідальності» з вісьмома принципами, назви яких починаються з літери *R* (англійською мовою – *retraceable, robust, recognizable, responsive, resilient, respected, reflexive, reliable*) – відстежуваність, стійкість, впізнаваність, відкритість, відновлюваність, авторитетність, рефлексивність, надійність. Для кожного з цих восьми принципів можна сформувати систему показників оцінювання, чи відповідає конкретне рішення певній меті. Зазначена структура є базовою і потребує подальшої апробації та удосконалення.

1. Відстежуваність (Retraceable) – гарантування повної прозорості проєктної, робочої, звітної документації та всіх геопросторових даних для можливості відстежування динамічних змін в екосистемі [6, 9]. Стосується стратегічних планів розвитку регіону, громади, містобудівної документації всіх рівнів, землевпорядної документації, ортофотопланів до початку реалізації проєкту та в процесі, інших матеріалів вишукувань та дистанційного зондування Землі. Підхід може бути оцінений як відношення кількості відкритої документації конкретного об'єкта до кількості виконаних етапів всього його життєвого циклу. На сьогодні у зв'язку з воєнним станом в Україні значна частина геопорталів закрита (публічна кадастрова карта, містобудівного кадастру), однак єдиного інформаційного ресурсу, що містив би інформацію про містобудівну, землевпорядну та проєктну документацію, а також про стан реалізації проєкту не існувало. Цей напрямок потребує детального опрацювання, в першу чергу, на державному рівні прийняття рішень.

2. Рефлексивність (Reflexive) – здатність проєктної команди та менеджменту до самоаналізу та критичного перегляду власних цілей і методів безпосередньо в процесі виконання проєктного рішення. Реалізація задуму має здійснюватися за етапами з чітко визначеними часовими рамками та критеріями перегляду (коригування) рішень [10].

Оцінювання здійснюється за допомогою аналізу задокументованих зауважень до проєкту, фінансових та соціальних аудитів. В подальшому необхідно розробити методику оцінювання організаційної рефлексивності на основі методичних процедур визначення особистої рефлексивності.

3. Відкритість (Responsive) – демонструє здатність почути кожного. На етапі формування ідеї проєкту забезпечується організація консультацій із громадянами та документування зустрічей, де відбувається прямий діалог у форматі запитань та відповідей, а також розроблення карт-схем суперечливих претензій, що візуалізують зони конфлікту інтересів всіх зацікавлених сторін. Практична реалізація відкритості здійснюється через моніторинг кількості учасників на нарадах щодо розроблення та втілення проєкту, забезпечення зворотного зв'язку, що свідчить про відкритість системи ухвалення рішень до врахування всіх інтересів. Підсумковим показником напрямку є результати опитувань громадян щодо рівня їхньої задоволеності, які демонструють, наскільки успішно проєкт врахував потреби та специфічні погляди зацікавлених сторін. Відкритість забезпечує перехід від жорсткого адміністрування до динамічного управління, орієнтованого на реальний суспільний запит. Принцип носить організаційний характер є елементом партисипативного управління та первинною ланкою соціально-психологічного впливу, що реалізується принципом впізнаваності.

4. Впізнаваність (Recognizable) – характеризує рівень впливу зацікавлених сторін на проєктні рішення та ступінь їхньої психологічної причетності до втілюваних змін. Підхід реалізуються в період розроблення, узгодження та затвердження проєкту через платформи для публічних обговорень, інтерактивні портали збору скарг, пропозицій, зауважень та технічні можливості для вільного обміну інформацією, що дозволяє учасникам відчувати себе частиною проєкту [6]. Результативність підходу оцінюється через показники опитувань щодо схвалення проєкту, за статистичними даними соціальної активності громади, а також у позитивній динаміці ринку землі. Коли пропоновані зміни є впізнаваним, вони перестають сприйматися як зовнішнє нав'язування, перетворюючись на спільну цінність, з якою місцеві жителі пов'язують свій добробут та майбутнє.

5. Авторитетність (Respected) – відображає ступінь медійного представлення проєктних рішень та оцінку сприйняття дій органів влади з боку зацікавлених сторін [9]. На етапі формування суспільної думки цей принцип реалізується через аналіз реакцій, претензій та позицій у соціальних медіа, групах спільних інтересів, акцентування уваги на вигодах для кожної групи зацікавлених осіб. Оцінювання здійснюється за рівнем публічної обізнаності та кількісно-якісними показниками щодо проведення цілеспрямованих інформаційних кампаній, які роз'яснюють цінність та переваги проєкту.

6. Стійкість (Robust) – визначає рівень стабільності об'єктів, процесів, функцій, властивостей екосистеми та протидії змінам, які відбуваються в ході реалізації проєкту з регулювання земельних відносин та після завершення робіт. Досягається шляхом створення надійних операційних та технічних систем [6]. На етапі стратегічного планування стійкість оцінується у середньо- та довгостроковій перспективі, відображається на картографічних та тематичних матеріалах, які окреслюють рівень безпеки системи. Процесуальна стійкість забезпечується шляхом впровадження інтегрованої моніторингової системи, яка аналізує масиви актуальної інформації про стан середовища та процесів. Результативність і фактичний вплив стійкості оцінюються через сталість довгострокових статистичних показників, зокрема даних ринку нерухомості та землі, а також через стабільність рівнів зайнятості та доходів населення. На відміну від відновлювання, стійкість спрямована на запобігання негативних впливів на екосистему через механізми планування, що дозволяють зберігати структурну цілісність системи навіть у періоди значної турбулентності.

7. Відновлювальність (Resilient) – забезпечення умов для можливості відновлення господарської діяльність відповідно до цільового призначення земельної ділянки після неочікуваних зовнішніх впливів [9]. На етапі проєктування формуються детальні звіти про оцінку впливу на фізичні та соціальні фактори життєдіяльності середовища та визначаються вразливі місця екосистеми до та після реалізації проєкту. Результативність підходу оцінюються за допомогою інструментів геопросторового моніторингу, які відстежують динаміку показників соціального добробуту та стан екосистем у довгостроковій перспективі. Такий підхід дозволяє переконатися, що проєктні рішення не лише створюють статичні об'єкти, а й формують життєздатне середовище, здатне до самовідновлення та збереження своєї цілісності під тиском непередбачуваних факторів.

8. Надійність (Reliable) – базується на забезпеченні абсолютної достовірності вихідних даних та обґрунтованості проєктних рішень, направлених на позитивний ефект виконаних робіт для громади (суспільства) [8]. Оцінювання здійснюється за: 1) достовірністю фактів, результатів вишукувань та досліджень земельних ділянок, на яких ґрунтуються рішення; 2) наявністю механізмів (процедур) регулярної перевірки фактів та/або належної оцінки фактів; 3) аналіз ефективності рішення, чи дійсно досягнуто передбачуваного результату проєкту.

Принципи утворюють замкнену систему наслідкових зв'язків де доповнюють один одного, окремі з них є передумовою для виконання інших, загальна схема їх взаємозв'язків наведена на рис.

Рис. Схема наслідкових зв'язків принципів відповідального управління земельними ресурсами

Джерело: розроблено автором.

Висновки. Відповідальне управління земельними ресурсами – це вищий рівень реалізації сталого землекористування на основі впровадження концепції життєво орієнтованого управління та розумної цифровізації. Структура принципів відповідального управління земельними ресурсами: відстежуваність, стійкість, впізнаваність, відкритість, відновлюваність, авторитетність, рефлексивність, надійність – є базовою і потребує подальшого дослідження для формалізації положень відповідно до законодавства України, розроблення національних показників оцінювання й наступного впровадження. Окремі елементи відповідального управління земельними ресурсами в Україні частково реалізовані, наприклад, відстежуваність та відкритість, однак цілісно як система управління не сформована.

Таким чином, подальші дослідження в цьому напрямку потребують вирішення таких завдань:

1) сформувати онтологічну модель відповідального управління земельними ресурсами на основі національної специфіки шляхом уточнення цілей та завдань;

2) визначити методологічний базис відповідального управління земельними ресурсами, як сукупність принципів та методів;

3) розробити функціональну та концептуальну модель відповідального управління земельними ресурсами;

4) розробити системи оцінювання підходів реалізації принципів відповідального землекористування;

5) провести апробацію результатів дослідження для різних рішень щодо регулювання земельними ресурсами;

6) внести зміни до земельного законодавства в частині запровадження життєво орієнтованого управління земельними ресурсами.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання текстів

Під час написання цього матеріалу автор використовував GEMINI для оформлення списку використаних джерел за міжнародним бібліографічним стандартом APA. Після використання цього інструменту/сервісу автор бере на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Smilka, V. A. (2019). The Role of Monitoring in Sustainable Development. *Baltic Journal of Real Estate Economics and Construction Management, 7(1),* 245-254. https://doi.org/10.2478/bjreecm-2019-0015.

2. de Vries, W. T. (2018). Opportunities and limits of making regions both lucrative and attractive. In *Opportunities and constraints of land management in local and regional development: Integrated knowledge, factors and trade-offs* (pp. 13–23). vdf Hochschulverlag AG. https://directory.doabooks.org/handle/20.500.12854/170009.

3. Mitchell, D., Clarke, M., & Baxter, J. (2008). Evaluating land administration projects in developing countries. *Land Use Policy*, 25, 464–473.

4. Lauesen, S. (2012). Why the electronic land registry failed. In *Proceedings of the International Working Conference on Requirements Engineering: Foundation for Software Quality* (pp. 1–15).

5. Reydon, B. P., Fernandes, V. B., & Telles, T. S. (2020). Land governance as a precondition for decreasing deforestation in the Brazilian Amazon. *Land Use Policy*, 94, 104313.

6. de Vries, W. T., & Chigbu, U. E. (2017). Responsible land management: Concept and application in a territorial rural context. *Flächenmanagement und Bodenordnung*, 79(2), 65–73.

7. Babalola, K., Hull, S., & Whittal, J. (2022). *Assessing land administration systems and their legal frameworks: A constitutional focus*. International Federation of Surveyors.

8. de Vries, W. T., & Rudiarto, I. (2023). Testing and enhancing the 8R framework of responsible land management with documented strategies and effects of land reclamation projects in Indonesia. *Land*, 12(1), 208. https://doi.org/10.3390/land12010208.

9. Gao, H., de Vries, W. T., Shen, W., & Qu, W. (2026). From sustainable to responsible: A biopolitics reinterpretation of '8 R' model. *Land Use Policy*, *161*, 107875. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2025.107875.

10. Ladysz, J. (2025). Recommendations for value creation, sustainability and responsibility in land-use management. *Procedia Computer Science*, *270*, 5073–5080. https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.09.634.

11. Enemark, S. (2006). Understanding the land management paradigm. In *Proceedings: Innovative technology for land administration* (pp. 17–27). International Federation of Surveyors. https://vbn.aau.dk/en/publications/understanding-the-land-management-paradigm.

12. Назаренко, О. В. (2017). Концепції управління земельними ресурсами: стан та перспективи трансформації. *Економіка: реалії часу*, (3(31)), 119–131.

13. de Vries, W. T., Bennett, R. M., & Zevenbergen, J. A. (2014). Neo-cadastres: Innovative solution for land users without state based land rights, or just reflections of institutional isomorphism? *Survey Review*, *47*(342), 220–229. https://doi.org/10.1179/1752270614y.0000000103.

14. Jepsen, M. R., Kuemmerle, T., Müller, D., Erb, K., Verburg, P. H., Haberl, H., Vesterager, J. P., Andrič, M., Antrop, M., Austrheim, G., Björn, I., Bondeau, A., Bürgi, M., Bryson, J., Caspar, G., Cassar, L. F., Conrad, E., Chromý, P., Daugirdas, V., ... Reenberg, A. (2015). Transitions in European land-management regimes between 1800 and 2010. *Land Use Policy*, *49*, 53–64. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.07.003.

15. Leins, S. (2020). Responsible investment: ESG and the post-crisis ethical order. *Economy and society, 49 (1),* 71-91. https://doi.org/10.1080/03085147.2020.1702414.

16. Salleh, A. (2013). *The idea of Earth system governance: Unifying tool*.

17. de Vries, W. T., Bennett, R. M., & Zevenbergen, J. (2015). Toward responsible land administration. In *Advances in responsible land administration* (pp. 3–14). CRC Press.

References

1. Smilka, V. A. (2019). The Role of Monitoring in Sustainable Development. *Baltic Journal of Real Estate Economics and Construction Management*, 7(1), 245-254. https://doi.org/10.2478/bjreecm-2019-0015.

2. de Vries, W.T. (2018) Opportunities and limits of making regions both lucrative and attractive. *Opportunities and Constraints of Land Management in Local and Regional Development. Integrated Knowledge. Factors and Trade-offs*. vdf Hochschulverlag AG and der ETH Zürich: Zürich, Switzerland, pp. 13-23. https://directory.doabooks.org/handle/20.500.12854/170009.

3. Mitchell, D.; Clarke, M.; Baxter, J. (2008) Evaluating land administration projects in developing countries. *Land Use Policy*, 25, pp. 464-473.

4. Lauesen, S. Why the electronic land registry failed. *In Proceedings of the International Working Conference on Requirements Engineering: Foundation for Software Quality*, Essen, Germany, 19-22 March 2012; pp. 1-15.

5. Reydon, B.P.; Fernandes, V.B.; Telles, T.S. Land governance as a precondition for decreasing deforestation in the Brazilian Amazon. Land Use Policy 2020, 94, 104313.

6. de Vries, W. T., & Chigbu, U. E. (2017). Responsible land management - Concept and application in a territorial rural context. fub. *Flächenmanagement und Bodenordnung*, 79(2), 65-73.

7. Babalola, K., Hull, S., & Whittal, J. (2022). Assessing Land Administration Systems and their Legal Frameworks: A Constitutional Focus. International Federation of Surveyors.

8. de Vries, W. T., & Rudiarto, I. (2023). Testing and Enhancing the 8R Framework of Responsible Land Management with Documented Strategies and Effects of Land Reclamation Projects in Indonesia. *Land*, 12(1), 208. https://doi.org/10.3390/land12010208.

9. Gao H, de Vries W., Shen W., Qu W. (2026). From sustainable to responsible: A biopolitics reinterpretation of '8 R' model. *Land Use Policy*. 161, 107875. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2025.107875.

10. Ladysz J. (2025). Recommendations for value creation, sustainability and responsibility in land-use management. *Procedia Computer Science*. Vol. 270, 2025, P. 5073-5080. https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.09.634.

11. Enemark, S. (2006). Understanding the land management paradigm. In Proceedings: Innovative technology for land administration (pp. 17–27). International Federation of Surveyors. https://vbn.aau.dk/en/publications/understanding-the-land-management-paradigm.

12. Nazarenko, O. V. (2017). Kontseptsii upravlinnia zemelnymy resursamy: stan ta perspektyvy transformatsii [Land resource management concepts: State and transformation prospects]. *Ekonomika: realii chasu – Economy of the actual time*, (3), 119-131.

13. de Vries W.T., Bennett R.M. & Zevenbergen J.A. (2015) Neo-cadastres: Innovative solution for land users without state based land rights, or just reflections of institutional isomorphism? *Survey Review*, 47 (342), pp. 220-229, https://doi.org/10.1179/1752270614Y.0000000103.

14. M.R. Jepsen, T. Kuemmerle, D. Mueller, et al (2015) Transitions in European land-management regimes between 1800 and 2010. *Land Use Policy*, 49. pp. 53-64, https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.07.003.

15. Leins, S. (2020). Responsible investment: ESG and the post-crisis ethical order. *Economy and society*, 49(1), 71-91. https://doi.org/10.1080/03085147.2020.1702414.

16. Salleh, A. (2013). The Idea of Earth System Governance. Unifying tool.

17. de Vries, W.T., Bennett, R.M., Zevenbergen, J. Toward Responsible (2015) Land Administration. *In Advances in Responsible Land Administration*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, pp. 3-14.

Дата першого надходження статті до видання: 23.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.01.2026

UDK 332.36:502.131.1

Vladyslav Smilka

Doctor in Technical Sciences, Professor of the Department of Theory of Architecture and Architectural Design,
Kyiv National University of Construction and Architecture (Ukraine, Kyiv)
E-mail: smilka.va@knuba.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-7025-9398
ResearcherID: NYT-3033-2025. **Scopus Author ID:** 57211859251

TRANSITION FROM SUSTAINABLE TO RESPONSIBLE LAND USE

Land management in practical terms involves changing land ownership rights or land-use regimes and is implemented through spatial development plans of territorial communities, as well as the approval of land management and urban planning documentation. Transformations in the land-use structure result in socio-economic and bio-physical changes. The evolution of public administration policies has progressed through three main stages: effective management, compliance with sustainable development concepts, and responsible management.

This article explores the essence of the eight new principles of land use: retraceable, robust, recognizable, responsive, resilient, respected, reflexive, reliable. These are positioned as the operational and analytical framework for responsible land management based on the concept of life-oriented land management. Responsible land management represents the highest level of sustainable land use implementation, achieved through the integration of life-oriented management concepts and smart digitalization. The framework of Responsible land management principles is foundational and requires further research to formalize its provisions in accordance with Ukrainian legislation, develop national assessment indicators, and ensure subsequent implementation. While specific elements of responsible land management, such as retraceability and openness, have been partially implemented in Ukraine, they have not yet been integrated into a cohesive, holistic management system.

This paper identifies the directions and tasks for future research aimed at implementing responsible land-use approaches, including: forming an ontological model of responsible land management based on national specificities by refining goals and objectives; defining the methodological basis of responsible land management as a comprehensive set of principles and methods; developing functional and conceptual models for responsible land management; designing systems for evaluating approaches to the implementation of responsible land management principles; conducting the validation (approbation) of research results across various land resource regulation decisions; proposing amendments to land legislation regarding the introduction of life-oriented land management.

Keywords: *land use; sustainable development; responsible management; principles; climate change; monitoring.*
Fig.: 1. Table: 1. References: 17.

Смілка В. А. Перехід від сталого до відповідального землекористування. *Технічні науки та технології*, 2026. № 1(43). С. 382-390. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-382-390.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-391-401
УДК 528.2

Оксана Василівна Гера

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геодезії та землеустрою
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу (Івано-Франківськ, Україна)
E-mail: oksana.hera@nung.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-6670-2820. **Scopus Author ID:** 57224954097

ПЕРЕХІД УКРАЇНИ ВІД БАЛТІЙСЬКОЇ СИСТЕМИ ВИСОТ ДО ЄВРОПЕЙСЬКОЇ ВЕРТИКАЛЬНОЇ РЕФЕРЕНЦНОЇ СИСТЕМИ У КОНТЕКСТІ ЄВРОІНТЕГРАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ТА МОДЕРНІЗАЦІЇ НАЦІОНАЛЬНОЇ ГЕОДЕЗИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Праця присвячена заміні застарілого радянського еталона 1977 року на висотну основу, якою послуговуються у країнах ЄС. Об'єктом дослідження є реформування вітчизняної координатної системи відповідно до вимог директиви INSPIRE. Викладено аналіз різних видів систем висот, описано недоліки БСВ-77 та позитивні кейси Польщі й держав Балтії у процесах переходу до EVRS. Висвітлено розробку актуальної моделі квазігеоїда УКГ2025 та перелік інженерно-геодезичних робіт, виконаних у 2007-2025 роках у межах підготовки до зміни системи висот. Встановлено, що впровадження нових норм дозволить модернізувати геодезичну інфраструктуру, а також точно проєктувати спільні транскордонні логістичні об'єкти.

Ключові слова: *Балтійська система висот (БСВ-77); Європейська вертикальна референцна система висот (EVRS); ортометрична висота; нормальна висота; геодезична висота; Об'єднана європейська нівелірна мережа (UELN); квазігеоїд УКГ2025.*

Рис.: 2. Табл.: 2. Бібл.: 16.

Актуальність теми дослідження. У результаті співпраці Держгеокадастру і Міністерства аграрної політики та продовольства України розроблено нормативний документ "Деякі питання використання Європейської вертикальної референцної системи (EVRS)", який прийняв КМУ у 2023 р. (Постанова №590 від 09.06.2023). У Постанові задекларовано перехід на території України від Балтійської системи висот 1977 року (БСВ-77) до Європейської вертикальної референцної системи – European Vertical Reference System (EVRS), починаючи з 1 січня 2026 р. Така реформа має важливу місію, а саме сприяє інтеграції національної інфраструктури геопросторових даних до глобальної та європейської інфраструктури геопросторових даних.

Постановка проблеми. Розглядаючи вказане питання, потрібно встановити якими системами висот послуговуються на сучасному етапі в інших країнах світу; на чому базуються та які принципи побудов таких систем. Важливо виконати аналіз та визначити відмінності Балтійської та Європейської систем висот, визначити перелік завдань та проблем на шляху переходу від однієї до іншої.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання модернізації системи висот України та необхідності відходу від застарілої БСВ-77 активно досліджувалися провідними українськими геодезичними школами протягом останніх двох десятиліть [1,2]. Науковці, зокрема Ю. Карпінський, К. Третяк, у своїх працях ґрунтовно довели теоретичну та практичну застарілість Балтійської системи, яка базується на Кронштадтському футштоку [3]. Основними її недоліками вчені називають невідповідність сучасним вимогам точності через накопичення похибок у державних нівелірних мережах минулих десятиліть, а також її політичну та технічну відірваність від загальноєвропейського геодезичного простору [4].

Значний внесок у розроблення національної моделі квазігеоїда зробили Ф. Заблоцький та Б. Джуман, які досліджували можливості побудови геометричної STHA-моделі геоїда для території західних областей України з метою забезпечення точної трансформації між геодезичними висотами GNSS та нормальними висотами системи EVRS [5]. І. Тревого, О. Марченко та Д. Марченко зосередили увагу на гравіметричних аспектах створення високоточної моделі гравітаційного поля України, що є критично важливим для коректного визначення квазігеоїда [2; 6; 7]. У свою чергу, А. Бондар у межах норма-

© О. В. Гера, 2026

тивно-технічного планування обґрунтував поетапну інтеграцію української мережі нівелювання до європейської, що дозволяє сьогодні забезпечити єдиний стандарт висот для транскордонних інженерних проєктів.

Однак слід зазначити, що більшість наукових праць українських авторів зосереджувалися на окремих технічних аспектах (гравіметрія, GNSS-нівелювання, регіональні моделі квазігеоїда), тоді як питання загальнодержавної стратегії впровадження, економічних аспектів та міжнародного досвіду залишалися недостатньо дослідженими до 2023 року, коли було прийнято Постанову КМУ № 590.

Метою статті є аналіз передумов, проблематики та перспектив переходу України від Балтійської системи висот 1977 року до Європейської вертикальної референцної системи (EVRS) у контексті євроінтеграційних процесів та модернізації національної геодезичної інфраструктури.

Виклад основного матеріалу.

Системи та види висот точок. Система висот – це одновимірна координатна система для вираження метричної відстані, або висоти, точки над референцною поверхнею вздовж чітко визначеного шляху. Теоретично виділяють дві групи систем висот, а саме геометричні та фізичні. Якщо референцна поверхня та висота пов'язані з еквіпотенціальними поверхнями і прямовисними лініями гравітаційного поля Землі, то така система називається фізичною системою висот. У випадку, якщо відлікова поверхня та висота не залежать від гравітаційного поля Землі, то система називається геометричною системою висот [8]. Для останніх, відліковою поверхнею служить референц-еліпсоїд, а вертикальні координати називаються геодезичною висотою, які за звичай, визначаються за допомогою супутникових систем позиціонування (GNSS).

Фізичні висоти точок визначають відносно геоїда, особливої еквіпотенціальної поверхні гравітаційного поля Землі, яка знаходиться близько до середнього рівня моря. Тому, з практичного погляду, середній рівень моря вважається рівнем нульової висоти, який встановлюється за даними тривалих спостережень на мареографічних постах за певні проміжки часу. Датчики припливів національних систем висот у Європі розташовані в різних океанах (Атлантичному) і внутрішніх морях: Балтійському, Північному, Середземному, Чорному. Оскільки середній рівень моря відрізняється від геоїда (до 2 м), висоти, визначені вздовж нівелірних мереж, що належать до певного мареографа, визначають місцеву систему висот. Наразі використовується понад 100 місцевих фізичних систем висот. Цікавий факт, що внутрішні країни, які не мають виходу до моря, виконують прив’язку своїх нівелірних мереж до сусідніх держав. У деяких випадках ці вимірювання були проведені ще в XIX столітті й, очевидно, є не надійними сьогодні. На рисунку нижче зображено еталонні мареографи для європейських національних систем висотних відліків та відхилення від EVRF2019 у см (рис. 1) [9].

Для визначення фізичних висот точок земної поверхні традиційно виконують геометричне нівелювання. Щоб отримати точні дані, необхідно враховувати поправки за непаралельність рівневих поверхонь, яка зумовлена впливом відцентрової сили (що викликана добовим обертанням Землі) та нерівномірним розподілом мас планети. Залежно від способу врахування непаралельності еквіпотенціальних поверхонь у результати нівелювання, розрізняють такі види фізичних висот: ортометричні, нормальні та динамічні. У деяких європейських країнах послуговуються висотами без врахування поправок за гравітацію (рис. 2) [10].

У цілому, ортометричні та нормальні висоти широко використовуються для визначення та реалізації систем фізичних висот, тоді як динамічні висоти застосовуються переважно для встановлення висотної координати водних об'єктів (наприклад, великих озер).

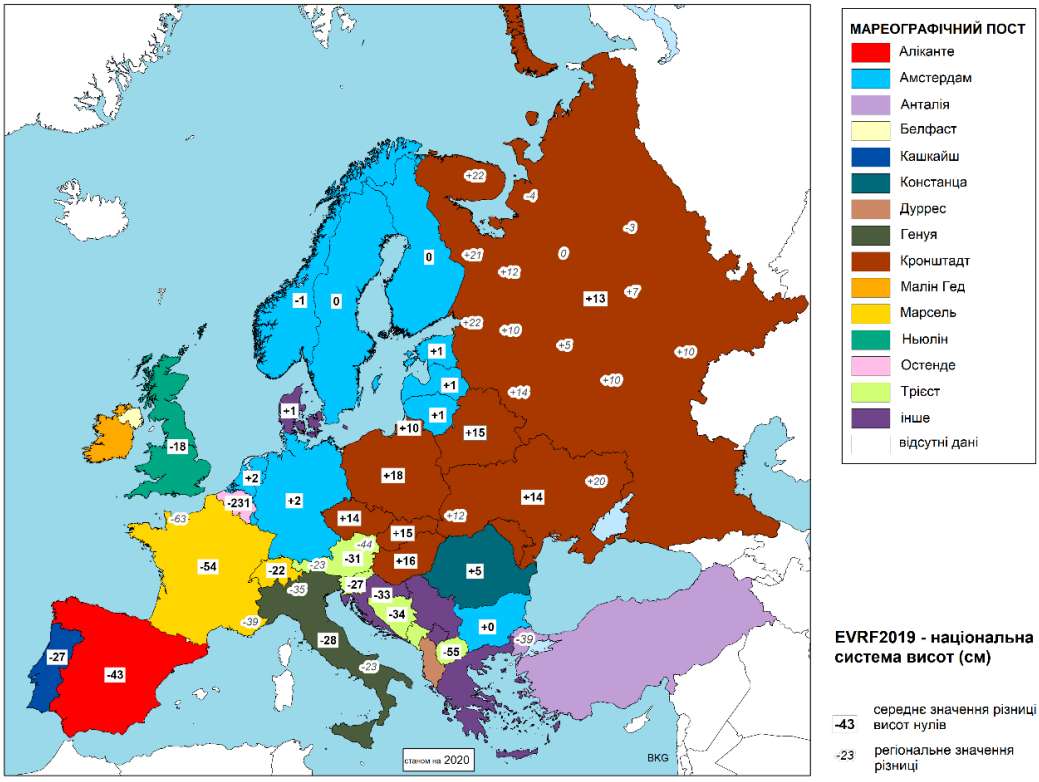


Рис. 1. Параметри перетворення від національних висот у Європі до EVRF2019 та референтні мареографічні пости (станом на 2020 рік)
Джерело: https://evrs.bkg.bund.de.

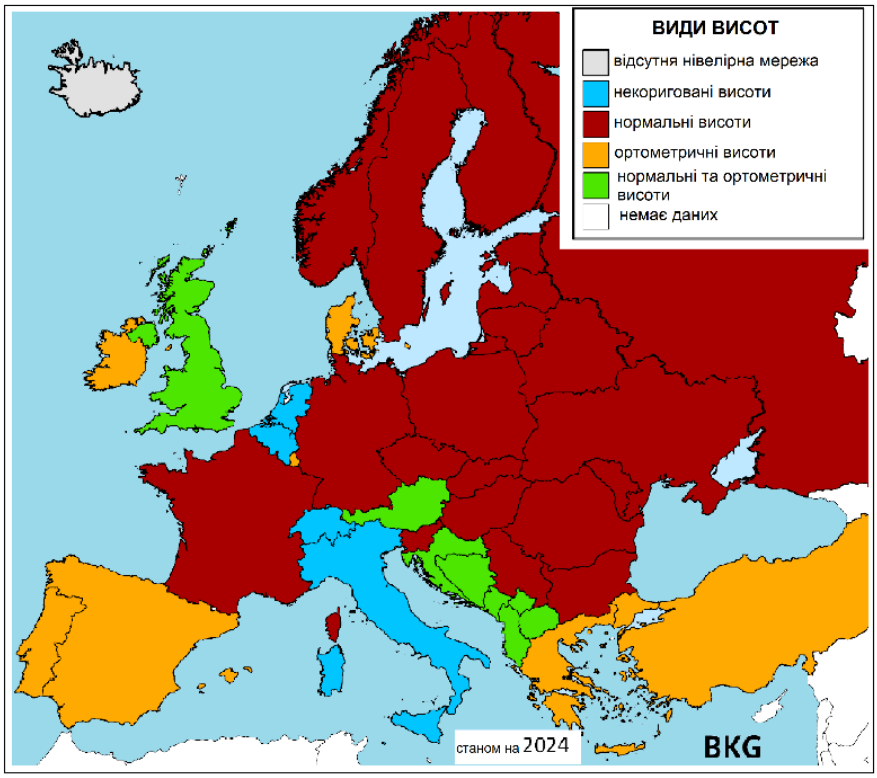


Рис. 2. Види висот національних систем висот країн Європи
Джерело: https://evrs.bkg.bund.de.

Системи фізичних висот, що ґрунтуються на ортометричних висотах, використовують геоїд як відлікову поверхню. Ті, які базуються на нормальних висотах, використовують квазігеоїд. Квазігеоїд близький до геоїда, проте, на відміну від нього, не є еквіпотенціальною поверхнею. На малих висотах різниця між ними становить від міліметрів до сантиметрів, а у високогір'ї відхилення може сягати до 1 м. В океанах поверхні геоїда та квазігеоїда, а також ортометричні та нормальні висоти практично збігаються. Трансформація між геометричними та фізичними системами висот описується рівняннями:

$$h = H + N \approx H^N + \zeta, \quad (1)$$

де h – геодезична висота, H та H^N – ортометрична та нормальна висоти відповідно, N – хвиля геоїда (відстань між поверхнею геоїда і поверхнею математично визначеного базового еліпсоїда), а ζ – аномалія висоти. Геоїд та квазігеоїд визначаються за допомогою методів точного моделювання гравітаційного поля та можуть застосовуватися у поєднанні із GNSS-позиціонуванням для отримання фізичних висот, без необхідності виконання нівелювання [11].

Зведена інформація щодо особливостей визначення, відліку, переваг та недоліків, а також деяких цікавих моментів різних видів висот наведено у таблиці 1.

Балтійська та Європейська вертикальна референцна системи висот. Балтійська система висот – це система абсолютних висот, прийнята в СРСР у 1977 році, відлік яких ведеться від нуля Кронштадтського футштока. У 1976-1977 роках Кронштадтський водомірний рівень було затверджено як еталонну нульову поверхню висот для Радянського Союзу. З метою уніфікації систем висот у країнах Східного блоку, цей рівень був також прийнятий більшістю держав Ради економічної взаємодопомоги, а також Югославією, як основа їхніх національних геодезичних систем висот.

З часом, унаслідок змін на геополітичній карті світу, а також розвитку вимірювальних технологій та обладнання для них, стали очевидними проблеми БСВ-77. Висотна відмітка передавалась шляхом виконання нівелювання нівелірними мережами, протяжність яких близько 2 тис. км, що сприяло накопиченню похибок. Геодезичні роботи вздовж ліній нівелювання виконувались у різні часові тривалі проміжки, адже потрібно було покрити висотною мережею велику площу території. Урівнювання здійснювали на кожному етапі вимірювань окремо. Тобто виміряні перевищення між нівелірними пунктами у БСВ ніколи сумісно не вирівнювались, що на практиці спричинило суперечність у висотній складовій. Фахівці також констатують складність адаптації цієї системи до використання методів супутникової геодезії [4]. Перелічені проблеми, у поєднанні з військовою агресією, зробили неможливим подальше використання БСВ та зумовили необхідність пошуку альтернатив.

З огляду на стратегічну важливість європейської інтеграції України в різних сферах, логічним і обґрунтованим став вибір європейської системи висот для заміни застарілої, тим більше що вона вже використовується більшістю сусідніх держав. У Європі питаннями створення, підтримки та розвитку єдиної Європейської геодезичної системи відліку (ETRS89) займається комісія Міжнародної асоціації геодезії – EUREF (Reference Frame Sub-Commission for Europe).

Передумови створення єдиної системи висот формувалися ще у 1950-1970-х роках шляхом об'єднання та спільного урівнювання національних нівелірних мереж. Результатом цього стало урівнювання Об'єднаної європейської нівелірної мережі (United European Leveling Network, UELN) у 1986 році, а згодом її розширення за рахунок країн Східної Європи.

Таблиця 1 – Порівняння різних видів висот точок

Критерій	Ортометрична висота	Нормальна висота	Динамічна висота	Геодезична (еліпсоїдальна) висота
Вид системи висот	Фізична система висот (залежить від гравітаційного поля Землі)	Фізична система висот (залежить від нормального гравітаційного поля)	Фізична система висот (базується на геопотенціалі)	Геометрична система висот не залежить від гравітації)
Референцна поверхня	Геоїд	Квазігеоїд	Рівнева поверхня нормального гравітаційного поля	Референц-еліпсоїд
Визначення	Відстань уздовж лінії сили тяжіння від точки до геоїда	Відстань уздовж лінії сили нормального поля тяжіння до квазігеоїда	Геопотенційне число, поділене на постійне значення γ_{45} (нормальна сила тяжіння на широті 45°)	Геометрична відстань по нормалі від точки до еліпсоїда
Переваги	✓ Фізично значуща – відображає реальну висоту над середнім рівнем моря ✓ Використовується у більшості світових систем висот	✓ Не потребує знання розподілу густини земної кори ✓ Висока точність визначення на практиці	✓ Найбільш придатна для гідрологічних робіт на великих територіях ✓ Усуває ефекти змін сили тяжіння	✓ Безпосередньо вимірюється GNSS-приладами ✓ Глобально узгоджена система ✓ Не потребує гравіметричних даних ✓ Висока точність визначення (см)
Недоліки	✗ Потребує знання розподілу густини мас усередині Землі ✗ Потребує гравіметричних вимірювань	✗ Квазігеоїд не є фізично значущою поверхнею (не еквіпотенціальна)	✗ Точки на одній горизонтальній площині мають різні динамічні висоти (через зміни сили тяжіння) ✗ Обмежене практичне застосування (переважно гідрологія)	✗ Не відповідає фізичній "висоті над рівнем моря" ✗ Непридатна для інженерних та гідрологічних застосувань без трансформації ✗ Потребує моделі геоїда для перетворення у фізичні висоти
Приклад системи висот	NAVD88 (США), CGVD28 (Канада), LHN95 (Швейцарія), NZVD2016	БСВ-77 (Україна до 2026 р.; Казахстан, Китай), DHHN2016 (Німеччина), EVRF2019 (ЄС)	IGLD85, Great Lakes Dynamic Heights	WGS84, ETRS89 (Європа), ITRF2014
Примітки (цікаві моменти)	📌 Різні країни використовують різні реалізації (урівнювання Німайєра, Гельмертові, точні ортометричні висоти) 📌 Найбільш зрозуміла для загального інженерного використання	📌 З часом дедалі більше європейських країн відмовляються від нормальних висот на користь ортометричних	📌 IGLD85 використовує динамічні висоти, тоді як NAVD88 — ортометричні (Гельмертові) 📌 Гідравлічні коректори потрібні для врахування топографії водної поверхні	📌 Різниця N (висота геоїда) варіює від -107 м до +85 м глобально 📌 Для переходу потрібна модель геоїда/квазігеоїда

Джерело: розроблено автором.

Відповідно до постанов симпозіуму EUREF 1994 року, у 1995 році роботи з UELN було відновлено з метою створення уніфікованої системи висот для Європи; перші результати цієї роботи були оприлюднені у 1999 році як реалізація EVRF2000 (European Vertical Reference Frame).

Паралельно було розроблено визначення та стандарти Європейської вертикальної референцної системи (European Vertical Reference System, EVRS), перше з яких ухвалено у 2000 році, а оновлене закріплено у Конвенціях EVRS 2007 року. Подальше накопичення нівелірних даних зумовило створення нових реалізацій системи, а саме EVRF2007 та EVRF2019.

Відповідно до Директиви європейського парламенту і Ради від 14.03.2007 р. про створення Інфраструктури просторової інформації у Європейському Співтоваристві (INSPIRE), прийняття для використання в Україні EVRS є необхідним для забезпечення гармонізації національної інфраструктури геопросторових даних з європейською та підвищення точності визначення висот. Отже, шлях України до переходу до нової системи висот розпочався у 2007 році і триває до сьогодні.

Європейська вертикальна референцна система визначається як кінематична система відліку висот. Опорною поверхнею служить рівнева поверхня зі сталим гравітаційним потенціалом поля тяжіння Землі, яка проходить через нуль Амстердамського футштоку. Висотні компоненти є різницями між потенціалом $-\Delta W_P$ гравітаційного поля Землі, яке проходить через деякі точки P, та потенціалом W_P умовного нульового рівня EVRS. Різниця потенціалів $-\Delta W_P$ також позначається як геопотенціальне число c_P:

$$-\Delta W_P = c_P = W_{0E} - W_P. \quad (2)$$

Нормальні висоти дорівнюють геопотенціальним числам, якщо референцне гравітаційне поле визначене. EVRS є системою з нульовим приливом (zero tidal system – гравітаційна система, у якій усувається потенціал, що генерується припливними силами, але зберігається потенціал від постійної деформації Землі, що зумовлюється цими силами) [12,13].

Досвід переходу сусідніх країн. Перехід до європейської системи координат є важливим етапом інтеграції країн Центральної та Східної Європи до спільного геодезичного простору. Досвід сусідніх країн України – Польщі та держав Балтії – демонструє як технічні, так і організаційні аспекти цього складного процесу.

Польща передбачила тривалий перехідний період для підготовки, а крайній термін впровадження EVRF2007 у Польщі як єдиної юридично дозволеної системи висот було встановлено на кінець 2023 року. Ключовим елементом переходу стало створення точної національної моделі квазігеоїда на основі європейських гравіметричних моделей геоїда (European Gravimetric Geoid, EGG). Польські дослідники провели валідацію моделей EGG2008 та EGG2015 для території Польщі, використовуючи різні методи підгонки. Основою для польської реалізації EVRS обрано ETRF2000. Для валідації моделі квазігеоїда науковці використовувала кілька GNSS/нівелірних мереж:

- EGG (European Unified Vertical Network): точність визначення аномалій висот оцінюється в ±2 см;
- POLREF: національна мережа з точністю висотної компоненти 3-4 см;
- ASG-EUPOS: мережа постійно діючих GNSS-станцій.

Після аналізу різних підходів польські геодезисти дійшли висновку про доцільність використання локально підігнаних моделей EGG замість чистих гравіметричних реалізацій, що забезпечує оптимальний баланс між точністю та практичною застосовністю [14].

Естонія здійснила перехід до EVRS з 1 січня 2018 року, присвятивши це 100-річчю незалежності країни. За даними Celms et al. [15] різниця між БСВ-77 та EVRS тут варіює від 185 мм на південному сході до 207 мм на північному заході країни, що демонструє

неоднорідність трансформаційних параметрів по території. Естонія встановила тримісячний перехідний період: усі будівельні проєкти, розпочаті до 1 січня 2018 року, могли виконуватися в старій системі БСВ-77. Це дозволило уникнути масових коригувань вже започаткованих проєктів.

Латвія розпочала використання EVRS як національної системи висот з 1 серпня 2014 року, вона отримала назву LAS-2000.5 (Latvia Normal Height System at epoch 2000.5). Латвійська національна нівелірна мережа I класу, що складалася з 15 полігонів та 51 лінії, була повністю переобчислена у 2011 році. Це створило надійну основу для впровадження EVRS. Латвія активно співпрацювала з Нордичними країнами в рамках Нордичної геодезичної комісії (NKG); Данією через секторальні програми з модернізації геодезичних мереж; Литвою – шляхом створення транскордонних нівелірних ліній [16].

У 2008 році Литва створила два прикордонні з'єднувальні пункти з Польщею, що дозволило фізично підключити литовську вертикальну мережу до європейської вертикальної мережі (UELN). Аналізуючи процес переходу до європейської системи висот сусідніх країн, можна виділити такі ключові пункти, які допомогли їм успішно досягнути цілі:

- ретельна технічна підготовка з акцентом на створення точних моделей квазігеоїда;
- достатній перехідний період для адаптації всіх користувачів;
- активна міжнародна співпраця та обмін досвідом;
- комплексна роз'яснювальна робота для широкого кола зацікавлених сторін.

Виклики, завдання та проблеми переходу України від БСВ-77 до EVRS. Загалом, проблемами використання БСВ-77 можна вважати неактуальні, некоректні дані та антагоністичні цілі з провайдером цієї системи. БСВ-77 використовувала застарілі на той час моделі нормального гравітаційного поля. Сучасні дослідження (наприклад, професора О. Марченка) показують, що поверхня квазігеоїда, яка використовувалася в СРСР, має значні відхилення від сучасних високоточних моделей у напрямку "північ-південь". Крім того, земна кора не є статичною. Різні темпи вертикальних рухів на півночі та півдні України за 50 років призвели до того, що реальні висоти реперів змінилися відносно значень, зафіксованих у каталогах 1977 року. Якщо порівняти БСВ-77 із сучасною європейською системою EVRF2019, то різниця висот не буде сталим числом. Саме тому неможливо просто внести поправки у висотні відмітки, а потрібно їх перевизначити у новій системі відліку.

За період 2007 – 2025 років, згідно з даними Науково-дослідного інституту геодезії і картографії, здійснено великий обсяг робіт, а саме:

1) пошук та збір геодезичної інформації по лініях нівелювання I, II, III класів на всій території держави;

2) створення цифрових нівелірних наборів з наступним їх завантаженням до державного Банку геодезичних даних;

3) реалізація додаткових нівелірних зв’язків із сусідніми країнами;

4) вирівнювання вузлових пунктів нівелірної мережі I класу в Центрі оброблення UELN Федерального агентства картографії і геодезії Німеччини у 2018-2020 рр.;

5) сумісне вирівнювання нівелірної мережі I, II, III класів параметричним методом за перевищеннями та різницями геопотенціальних чисел;

6) укладення зведених каталогів координат.

За результатами ґрунтовних досліджень та розрахунків (даних гравіметричних карт, вимірювань на пунктах гравіметричної мережі, даних супутникової альтиметрії) – визначено розподіл аномалій сили тяжіння на територію України. І у 2025 році було представлено модель гібридного квазігеоїда УКГ2025 (UKG2025).

Загалом можна резюмувати, що нормативно-правова база (Постанова КМУ), модель для трансформації, урівняна нівелірна мережа I – III класів, каталог із понад 30 тис. пунктів – базові необхідно кроки – виконані. Для успішної реалізації та практичного використання

нової системи висот варто здійснити перелік заходів, які можна об'єднати у такі стратегічні напрямки: врахування цього переходу у всіх дотичних нормативних документах, оновлення даних ДЗК та перевидання топографічних карт; навчання та тренінги для інженерів та здобувачів освіти в галузі; відновлення втрачених реперів та остаточне включення української геодезичної мережі до європейської; тісна міжнародна співпраця (детально в табл. 2).

Таблиця 2 – Завдання на 2026 рік

Напрям	Зміст робіт
Фізична інтеграція до UELN	Держгеокадастр повинен завершити комплекс робіт щодо включення нівелірної (висотної) мережі України до UELN. Прокладання міжнародних нівелірних ліній до Польщі, Словаччини, Угорщини, Румунії. Участь у міжнародних кампаніях вимірювань EUREF.
Перерахунок кадастрових даних	Трансформація мільйонів записів про земельні ділянки з БСВ-77 в EVRS. Валідація перерахованих даних. Оновлення меж земельних ділянок (де є висотні дані).
Оновлення топографічних карт	Перерахунок висотних позначок на картах. Оновлення цифрових картографічних баз даних. Публікація нових видань карт.
Навчання та сертифікація фахівців	Масове перенавчання геодезистів та землевпорядників (курси, тренінг). Семінари для будівельників та проєктувальників. Оновлення навчальних програм у ВНЗ.
Програмне забезпечення	Оновлення всіх геоінформаційних систем. Створення вебсервісів для трансформації висот. Інтеграція в існуючі GNSS-сервіси.
Відновлення після воєнних дій	Інвентаризація пошкоджених геодезичних пунктів. Відновлення реперів на деокупованих територіях. Нівелірні роботи в зонах, де мережа пошкоджена.
Міжнародна співпраця	Участь у робочих групах EUREF. Обмін даними з сусідніми країнами ЄС. Залучення міжнародних експертів. Отримання грантів від ЄС на модернізацію геодезичної інфраструктури.

Джерело: розроблено автором.

Хоча перехід є трудомістким через необхідність перерахунку величезних масивів даних, він є критично важливим для інтеграції в європейські інфраструктурні проєкти. Це дозволяє усунути 15-20 см різницю на кордонах з країнами ЄС, що є обов'язковою умовою для будівництва спільних залізниць, трубопроводів та мостів. Впровадження EVRS є не лише технічним оновленням, але й кроком до євроінтеграції та відповідності Угоді про асоціацію з ЄС, спрощенням міжнародного співробітництва та символічним розривом з пострадянським простором.

Висновки. У представленому дослідженні здійснено всебічний аналіз процесу відмови від застарілої радянської системи БСВ-77 на користь європейського стандарту EVRS. Систематизовано теоретичні засади визначення фізичних висот, порівняно різні методи нівелювання та обґрунтовано переваги використання нормальних висот у поєднанні з сучасними супутниковими технологіями. Особливу увагу приділено практичному етапу підготовки національної геодезичної мережі протягом 2007–2025 років, що включав створення цифрових масивів даних, урівнювання ліній нівелювання спільно з європейськими центрами та розробку високоточної моделі квазігеоїда УКГ2025.

Проведений аналіз дозволяє зробити висновок, що перехід до системи EVRS є критичною умовою для інтеграції України в європейський геопростір та реалізації вимог директиви INSPIRE. Встановлено, що ліквідація розбіжностей у висотних відмітках дозволить уникнути технічних помилок при проєктуванні спільних транскордонних об'єктів та модернізувати національну інфраструктуру. Крім того, впровадження нових

стандартів забезпечує високу точність даних завдяки врахуванню актуальних геодинамічних процесів та сучасних гравітаційних моделей.

Успішна реалізація реформи з 2026 року потребуватиме комплексного підходу: від трансформації записів у кадастрових системах до перевидання топографічних карт та навчання фахівців. Досвід сусідніх країн, таких як Польща та країни Балтії, підтверджує, що запорукою успіху є поєднання ретельної технічної підготовки, перехідного періоду для адаптації проєктів та активної міжнародної співпраці.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ у процесі написання тексту статті

Під час написання цього матеріалу автор використовувала Google Gemini та NotebookLM – для швидкого та якісного пошуку найбільш відповідних англомовних літературних джерел, а також для коректної адаптації термінів українською мовою.

Після використання Google Gemini та NotebookLM, автор переглянула та відредагувала зміст та взяла на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Sossa, R. (2021). Contemporary status of topographic mapping in Ukraine. *Polish Cartographical Review, 53*(1), 1–12. https://doi.org/10.2478/pcr-2021-0001.

2. Trevoho, I., Zablotskyi, F., Piskorek, A., Dzhuman, B., & Vovk, A. (2021). About modernization of Ukrainian height system. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography, 93*, 13–26. https://doi.org/10.23939/istcgcap2021.93.013.

3. Karpinskyi, Y., & Maliuk, O. (2024). The methodological framework for the integration of national and pan-european spatial data infrastructures (INSPIRE). *Spatial Development, 10*, 458–470. https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.10.458-470.

4. Zablotskyy, F., Dzhuman, B., & Brusak, I. (2021). On the accuracy of (quasi) geoid models relatively UELN/EVRS2000 height systems. *Modern Achievements of Geodesic Science and Industry, 41*(I), 29–36. https://doi.org/10.33841/1819-1339-1-41-29-36.

5. Заблоцький, Ф., & Джуман Б. (2021). Побудова геометричної STHA-моделі геоїда на територію Львівської області. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва, II* (42), 49-56. https://doi.org/10.33841/1819-1339-2-42-49-56.

6. Marchenko, O. N., Kucher, O. V., & Marchenko, D. O. (2015). Regional quasigeoid solutions for the Ukraine area. *GEODYNAMICS,* Issue19, 7–14.

7. Sohor, A., Marchenko, D., & Kryva, K. (2024). Methods of calculating the parameters of the reference ellipsoid according to the data of the regional gravity field of the Earth. *Technical Sciences and Technologies, 1*(35), 346–356. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1(35)-346-356.

8. Hofmann-Wellenhof, B., & Moritz, H. (2006). *Physical geodesy*. Springer Vienna. https://doi.org/10.1007/978-3-211-33545-1.

9. Sánchez, L., Crespi, M., & Tanaka, Y. (n.d.). *Height systems*. Global Geodetic Observing System. Retrieved January 19, 2026, from https://geodesy.science/item/height-systems.

10. Schwabe, J., & Sacher, M. (2024). *Overview of national realizations of the integrated geodetic reference in Europe (Version 1.0)*. Federal Agency for Cartography and Geodesy. https://doi.org/10.71603/NATREFEUROPE.

11. Vaníček, P., & Santos, M. (2019). What Height System Should be Used in Geomatics. *International Journal of Earth & Environmental Sciences, 4*(1). https://doi.org/10.15344/2456-351X/2019/160

12. International Association of Geodesy. (1983). *Resolutions No. 9 and 16: Tidal systems in geodesy* [Conference resolutions]. XVIII General Assembly, Hamburg, Germany.

13. Ihde, J., & Augath, W. (2002). The European Vertical Reference System (EVRS), its relation to a world height system and to the ITRS. In J. Ádám & K.-P. Schwarz (Eds.), *Vistas for geodesy in the new millennium* (Vol. 125, pp. 78–83). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-04709-5_14.

14. Marjańska, D., Olszak, T., & Piętka, D. (2019). Validation of European Gravimetric Geoid models in context of realization of EVRS system in Poland. *Geodesy and Cartography*, 329–347. https://doi.org/10.24425/gac.2019.128461.

15. Celms, A., Bimane, I., Reiniks, M., & Reke, I. (2014). European Vertical Reference System in Baltic countries. *Baltic Surveying, 1*, 49–55.

16. Celms, A., Reke, I., Rekus, D., & Balevicius, G. (2017). National height system testing in Baltic countries using GNSS measurements. In *2017 Baltic Geodetic Congress (BGC Geomatics)* (pp. 257–262). https://doi.org/10.1109/BGC.Geomatics.2017.38.

References

1. Sossa, R. (2021). Contemporary status of topographic mapping in Ukraine. *Polish Cartographical Review, 53*(1), 1–12. https://doi.org/10.2478/pcr-2021-0001.

2. Trevoho, I., Zablotskyi, F., Piskorek, A., Dzhuman, B., & Vovk, A. (2021). About modernization of Ukrainian height system. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography, 93*, 13–26. https://doi.org/10.23939/istcgcap2021.93.013.

3. Karpinskyi, Y., & Maliuk, O. (2024). The methodological framework for the integration of national and pan-european spatial data infrastructures (INSPIRE). *Spatial Development, 10*, 458–470. https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.10.458-470.

4. Zablotskyy, F., Dzhuman, B., & Brusak, I. (2021). On the accuracy of (quasi) geoid models relatively UELN/EVRS2000 height systems. *Modern Achievements of Geodesic Science and Industry, 41*(I), 29–36. https://doi.org/10.33841/1819-1339-1-41-29-36.

5. Zablotskyi, F., & Dzhuman B. (2021). Pobudova heometrychnoi STHA-modeli heoida na terytoriiu Lvivskoi oblasti [Construction of a geometric STHA model of the geoid for the territory of the Lviv region]. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva – Recent advances in surveying science and technology, II (42), 49-56.* https://doi.org/10.33841/1819-1339-2-42-49-56.

6. Marchenko, O. N., Kucher, O. V., & Marchenko, D. O. (2015). Regional quasigeoid solutions for the Ukraine area. *GEODYNAMICS,* Issue19, 7–14.

7. Sohor, A., Marchenko, D., & Kryva, K. (2024). Methods of calculating the parameters of the reference ellipsoid according to the data of the regional gravity field of the Earth. *Technical Sciences and Technologies, 1*(35), 346–356. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1(35)-346-356.

8. Hofmann-Wellenhof, B., & Moritz, H. (2006). *Physical geodesy*. Springer Vienna. https://doi.org/10.1007/978-3-211-33545-1.

9. Sánchez, L., Crespi, M., & Tanaka, Y. (n.d.). *Height systems*. Global Geodetic Observing System. Retrieved January 19, 2026, from https://geodesy.science/item/height-systems.

10. Schwabe, J., & Sacher, M. (2024). *Overview of national realizations of the integrated geodetic reference in Europe (Version 1.0)*. Federal Agency for Cartography and Geodesy. https://doi.org/10.71603/NATREFEUROPE.

11. Vaníček, P., & Santos, M. (2019). What Height System Should be Used in Geomatics. *International Journal of Earth & Environmental Sciences, 4*(1). https://doi.org/10.15344/2456-351X/2019/160

12. International Association of Geodesy. (1983). *Resolutions No. 9 and 16: Tidal systems in geodesy* [Conference resolutions]. XVIII General Assembly, Hamburg, Germany.

13. Ihde, J., & Augath, W. (2002). The European Vertical Reference System (EVRS), its relation to a world height system and to the ITRS. In J. Ádám & K.-P. Schwarz (Eds.), *Vistas for geodesy in the new millennium* (Vol. 125, pp. 78–83). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-04709-5_14.

14. Marjańska, D., Olszak, T., & Piętka, D. (2019). Validation of European Gravimetric Geoid models in context of realization of EVRS system in Poland. *Geodesy and Cartography*, 329–347. https://doi.org/10.24425/gac.2019.128461.

15. Celms, A., Bimane, I., Reiniks, M., & Reke, I. (2014). European Vertical Reference System in Baltic countries. *Baltic Surveying, 1*, 49–55.

16. Celms, A., Reke, I., Rekus, D., & Balevicius, G. (2017). National height system testing in Baltic countries using GNSS measurements. In *2017 Baltic Geodetic Congress (BGC Geomatics)* (pp. 257–262). https://doi.org/10.1109/BGC.Geomatics.2017.38.

Дата першого надходження статті до видання: 19.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 14.01.2026

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

UDC 528.2

Oksana Gera

PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Geodesy and Land Management
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Ivano-Frankivsk, Ukraine)
E-mail: oksana.hera@nung.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-6670-2820. **Scopus Author ID:** 57224954097

UKRAINE'S TRANSITION FROM THE BALTIC HEIGHT SYSTEM TO THE EUROPEAN VERTICAL REFERENCE SYSTEM IN THE CONTEXT OF EUROPEAN INTEGRATION AND MODERNIZATION OF NATIONAL GEODETIC INFRASTRUCTURE

The article addresses the strategic transition of Ukraine from the obsolete Baltic Height System 1977 (BHS-77) to the European Vertical Reference System (EVRS). The objective of this work is to provide a comprehensive analysis of the prerequisites, challenges, and outcomes of preparing the national geodetic infrastructure for implementing European standards as of January 1, 2026, in accordance with Cabinet of Ministers Resolution No. 590. The relevance of this topic is driven by the need to harmonize national geospatial data with the requirements of the INSPIRE Directive.

The study examines theoretical distinctions between geometric and physical height systems, and substantiates the advantages of using normal heights for modern geodesy. Critical deficiencies of BHS-77 have been identified: the use of outdated gravity field models, accumulation of significant errors in leveling networks exceeding 2,000 km in length, and the complexity of adapting the system to satellite GNSS technologies. Based on the analysis of the experience of Poland and the Baltic States, key factors for successful reform have been identified, including the development of accurate local quasigeoid models and the establishment of adaptive transitional periods for engineering projects.

The study describes the complex of works carried out by Ukrainian specialists from 2007 to 2025: digitization of leveling lines of all classes, their joint adjustment at the Federal Agency for Cartography and Geodesy of Germany (BKG), and the creation in 2025 of the hybrid quasigeoid model UQG2025 (Ukrainian Quasigeoid 2025). A strategic action plan for 2026 has been formulated, including the transformation of millions of cadastral records, republication of topographic maps, and restoration of network benchmarks in de-occupied territories.

The conclusions demonstrate that the implementation of EVRS eliminates height discrepancies at the borders with EU countries, which is a critical condition for designing joint cross-border infrastructure projects. The reform is not merely a technical update but a strategic step toward full integration into the European geospatial framework and definitive departure from post-Soviet scientific standards.

Keywords: *Baltic Height System (BHS-77); European Vertical Reference System (EVRS); orthometric height; normal height; ellipsoidal height; United European Levelling Network (UELN); quasigeoid UQG2025.*

Fig.: 2. Table: 2. References: 16.

Гера О. В. Перехід України від Балтійської системи висот до Європейської вертикальної референцної системи у контексті євроінтеграційних процесів та модернізації національної геодезичної інфраструктури *Технічні науки та технології*, 2026. № 1(43). С. 391-401. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-391-401.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-402-414
УДК 69.055:004.9

Анатолій Володимирович Ковров[1], Тельман Іванович Марченко[2]

[1]кандидат технічних наук, професор, ректор
Одеська державна академія будівництва та архітектури (Одеса, Україна)
E-mail: rector@ogasa.org.ua. **ORCID**: https://orcid.org/0000-0001-9408-3246

[2]здобувач ступеня доктора філософії
Одеська державна академія будівництва та архітектури (Одеса, Україна)
E-mail: t9400354@gmail.com. **ORCID**: https://orcid.org/0009-0001-0687-7909

КОНЦЕПЦІЯ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОГО НАГЛЯДУ ПРИ РЕСТАВРАЦІЇ ПАМ'ЯТОК АРХІТЕКТУРИ ТА МІСТОБУДУВАННЯ

Стаття розробляє концепцію науково-технічного нагляду для реставрації культурних пам'яток, гармонізуючи принципи ICOMOS з українським законодавством. Проаналізовано доктринальні розриви між Венеційською хартією та ДСТУ-Н Б В.3.2-4:2016. Запропоновано організаційну модель залучення технічного нагляду при реставрації пам'яток архітектури та містобудування, що включає подвійне замовлення, спецпідготовку інженера технагляду та цифровий контроль. Уперше системно обґрунтовано організаційну модель науково-технічного нагляду при реставрації пам'яток архітектури та містобудування, що інтегрує доктрину ICOMOS, подвійне замовлення та цифровий контроль. Очікуваний ефект включає: економію кошторисної вартості, підвищення якості робіт, зниження корупційних ризиків. Алгоритм впровадження охоплює 4 етапи — від розроблення нормативно-правової бази до масштабування та інституалізації запропонованої концепції. Надалі модель може бути масштабована на загальне будівництво.

Ключові слова: *науково-технічний нагляд; реставрація пам'яток; ICOMOS; BIM; цифровізація; пам'ятка архітектури та містобудування; науково-технічний супровід.*

Табл.: 6. Рис.: 2. Бібл.: 18.

Актуальність теми дослідження. У сучасних умовах післявоєнного відновлення України реставрація понад 7 800 пам'яток архітектури, внесених до Державного реєстру Мінкульту, потребує радикально нової системи технічного нагляду. Чинне законодавство (ДСТУ-Н Б В.3.2-4:2016, Постанова КМУ №903 тощо) покладає контроль на замовника (балансоутримувача пам'ятки), що створює системний конфлікт інтересів та може суперечити доктринальним принципам ICOMOS — автентичності, зворотності втручань, мінімального впливу на історичну субстанцію. Відсутність аналогічних інституційних рішень в національній практиці призводить до системних порушень: заміни автентичних матеріалів сучасними аналогами, ігнорування історичних нашарувань, необґрунтованих перевитрат кошторисів. Техніко-економічний ефект включає: впровадження цифрової звітності через BIM та геоприв'язану фотофіксацію, що може знизити корупційні ризики, усуваючи фальсифікацію актів виконаних робіт. Науково-технічний супровід скорочує перевитрати кошторисів за рахунок альтернативних розрахунків конструкцій та обґрунтування відхилень. Контроль автентичності матеріалів підвищує якість робіт, а автоматизований моніторинг IoT та дронів економить трудовитрати інженерів технагляду, при цьому підвищуючи якість контролю та вводячи цифровий громадський контроль.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Міжнародна рада з питань охорони пам'яток і визначних місць (ICOMOS) – це міжнародна неурядова професійна організація, метою якої є збереження та захист об'єктів культурної спадщини в усьому світі; вона об'єднує експертів у галузі реставрації, архітектури, археології, історії мистецтва, інженерії та права, розробляє міжнародні документи (хартії, декларації, рекомендації) і виступає основним радником ЮНЕСКО з питань всесвітньої спадщини. ICOMOS не є структурним підрозділом ЮНЕСКО, але входить до її «екосистеми» як головний професійний радник з питань всесвітньої спадщини. Для об'єктів культурної спадщини (на відміну від природної) саме ICOMOS готує експертні висновки щодо номінацій до Списку всесвітньої спадщини, стану збереження, необхідності внесення до List of World Heritage in Danger тощо. ICOMOS здійснює місії технічної допомоги, моніторинг, підготовку рекомендацій щодо управління об'єктами, які Комітет ЮНЕСКО враховує при прийнятті рішень [1].

© А. В. Ковров, Т. І. Марченко, 2026

ICOMOS створено у 1965 році як міжнародну асоціацію професіоналів, що займаються збереженням та реставрацією пам'яток і історичних місць. Одним з основних завдань ICOMOS є вироблення та ухвалення міжнародних документів щодо захисту, збереження та презентації об'єктів культурної спадщини, які використовуються при підготовці документів ЮНЕСКО, Ради Європи та в національному законодавстві багатьох країн, зокрема України. ICOMOS діє через міжнародні наукові комітети та національні комітети (наприклад, Український національний комітет ICOMOS), які адаптують міжнародні принципи до національної практики [1].

ICOMOS не має одного «кодексу» на кшталт технічного регламенту, натомість формує корпус документів різного статусу:

− Хартії (Charters) – базові принципові документи, що формулюють доктринальні засади охорони та реставрації (наприклад, Венеційська хартія, Вашингтонська хартія тощо).

− Настанови / керівні принципи (Guidelines) – більш прикладні документи, що деталізують методи, процедури та критерії оцінки стану і втручань у спадщину.

− Декларації (Declarations) – документи, що фіксують позицію ICOMOS з важливих питань політики охорони спадщини або нових викликів (урбанізація, туризм, зміна клімату).

− Резолюції (Resolutions) – рішення Генеральних асамблей та інших органів ICOMOS щодо напрямів діяльності, рекомендацій урядам та професійній спільноті.

− Рекомендації (Recommendations) – документи консультативного характеру, що пропонують підходи до тлумачення і застосування принципів збереження в конкретних ситуаціях.

Нижче наведений перелік ключових хартій, які зазвичай використовуються як концептуальна база для системи контролю реставраційних робіт:

− Венеційська хартія з консервації та реставрації пам'яток і визначних місць (International Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Sites, 1964) – основний документ, що вводить принципи автентичності, мінімального втручання, зворотності та поваги до історичних нашарувань [2].

− Флорентійська хартія щодо історичних садів (Florence Charter, 1981) – визначає принципи охорони й догляду за історичними садами та ландшафтами, важлива для об'єктів з ландшафтним компонентом [3].

− Вашингтонська хартія щодо охорони історичних міст і міських територій (Charter for the Conservation of Historic Towns and Urban Areas, 1987) – формвє принципи контролю змін в історичному міському середовищі, включно з регулюванням нової забудови [4].

− Хартія ICOMOS про аналіз, консервацію та реставрацію конструкцій архітектурної спадщини (ICOMOS Charter – Principles for the Analysis, Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage, 2003) – встановлює принципи обстеження, розрахунків, посилення та моніторингу конструкцій історичних будівель [5].

− Міжнародна хартія з традиційного будівництва (International Charter on the Built Vernacular Heritage / Traditional Building Heritage, 1999) – регламентує підходи до збереження традиційних конструкцій, матеріалів і ремесел, що важливо для контролю якості реставраційних робіт на народній та історичній забудові [6].

Ці стандарти структурують систему контролю наступним чином:

− Хартії формують доктрину контролю: що вважається допустимим втручанням, як оцінюється автентичність, які межі адаптації пам'яток до сучасного використання.

− Настанови й рекомендації задають процедурну рамку: фіксація вихідного стану, вимоги до наукового обґрунтування рішень, документування всіх втручань, залучення мультидисциплінарних команд.

– Резолюції та декларації спрямовують політику держав і професійної спільноти, підкреслюючи пріоритети – від запобігання надмірній комерціалізації до інтеграції цифрових технологій в охорону спадщини.

Реалізація принципів ICOMOS в концептуальних та українських нормативних документах наведена в табл. 1.

Таблиця 1 – Аналіз реалізації принципів ICOMOS в концептуальних та українських нормативних документах [2-10]

Принцип ICOMOS	Ключові документи	Наслідки для технічного нагляду	Відображення в чинних нормативних актах
Автентичність	Венеційська хартія	Перевірка відповідності проєктних рішень і робіт оригінальним матеріалам, конструкціям та планувальній структурі; фіксація всіх змін як «історії втручань»	ДСТУ-Н Б В.3.2-4:2016; ДБН А.2.2-14:2016: максимальне збереження історичної субстанції та культурної цінності пам'ятки
Мінімальне втручання	Венеційська хартія; Хартія щодо аналізу, консервації конструкцій	Оцінка достатності й пропорційності кожного втручання; обґрунтування обсягу робіт; фіксація надмірної заміни елементів	ДСТУ-Н Б В.3.2-4:2016: принцип «мінімального втручання в історичну субстанцію» для консервації та реставрації
Зворотність рішень	Венеційська хартія; Хартія щодо аналізу, консервації конструкцій	Контроль технологій і матеріалів, що демонтуються без шкоди автентичній субстанції; відмова від незворотних методів без потреби	Не прямо сформульовано; опосередковано через захист автентичності (ДСТУ-Н Б В.3.2-4:2016, ДБН А.2.2-14:2016)
Повага до історичних нашарувань	Венеційська хартія; Вашингтонська хартія	Збереження значущих історичних фаз; недопущення «очищення» до одного стилю; нові елементи не домінують над історичними	ДСТУ-Н Б В.3.2-4:2016; ДБН А.2.2-14:2016: історичні модифікації як частина автентичності
Урахування контексту середовища	Вашингтонська хартія	Перевірка впливу на силует, масштаби, панорами; сумісність добудов з оточенням; візуалізації та обґрунтування	Закон «Про охорону культурної спадщини»: контроль історичних ареалів; субсидіарно ДБН А.2.2-3:2014
Наукове обґрунтування втручань	Хартія щодо аналізу, консервації конструкцій	Контроль досліджень (архівних, натурних, лабораторних); використання в проєкті; науково-технічне досьє	ДБН А.2.2-14:2016: обов'язкові дослідження та документація
Документування та фіксація	Більшість хартій ICOMOS	Фото-, відео-, графічна фіксація стану до/під час/після робіт; журнали та архіви для моніторингу.	ДБН А.2.2-14:2016; ДСТУ-Н Б В.3.2-4:2016: вимоги до документування
Мультидисциплінарний підхід	Загальні документи ICOMOS	Залучення інженерів, реставраторів, істориків, матеріалознавців; узгодженість висновків	Частково в ДБН А.2.2-14:2016 та ДСТУ-Н Б В.3.2-4:2016: участь спеціалізованих організацій
Традиційні матеріали/ технології	Хартія з традиційного будівництва; Венеційська хартія	Сумісні матеріали; фіксація заміни традицій; залучення майстрів	ДСТУ-Н Б В.3.2-4:2016: переважне застосування традиційних технік, сучасні — з науковим обґрунтуванням
Прозорість і підзвітність	Резолюції ICOMOS	Звітність перед органами/громадськістю; відкриті реєстри; цифрові платформи	Закон «Про охорону культурної спадщини»: нагляд органів; в ЄДЕССБ без цифрової прозорості

Українські нормативи у сфері реставрації культурної спадщини (ДБН А.2.2-14:2016, ДСТУ-Н Б В.3.2-4:2016 [8, 9, 10]) зосереджені переважно на технології робіт та проєктній документації. Прямі детальні вимоги до технічного нагляду фрагментарні — вони частково інтегровані через загальні будівельні норми (ДБН А.3.1-5:2016 [11]) та Закон "Про охорону культурної спадщини" [7]. Таблиця 2 містить нормативні вимоги до технічного нагляду при реставрації пам’яток архітектури та містобудування. Ці вимоги не деталізують

технічний нагляд як окрему інституцію для реставрації, що підкреслює потребу в новій концепції науково-технічного нагляду. Ключові рекомендації для технагляду включають:

1. Необхідність розробки регламенту незалежності контролера — чинні норми (ДБН А.2.2-14:2016б ДСТУ-Н Б В.3.2-4:2016 [8, 10]) покладають технагляд на замовника, що суперечить принципам ICOMOS про нейтральність.

2. Посилення цифрової регламентації — документування зводиться до паперових журналів, без вимог до BIM, IoT чи відкритих реєстрів, що блокує прозорість і моніторинг.

Науково-технічний нагляд, замовлений органами охорони спадщини з обов'язковим цифровим звітом у форматі, сумісному з ЄДЕССБ, може заповнити доктринальні розриви між ICOMOS та національною практикою.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Аналіз нормативних документів в сфері технічного нагляду показує, що Постанова КМУ № 903 [13] єдиним документом, що прямо встановлює необхідність технагляду для реставрації, але:

- Не враховує необхідності реалізації принципів ICOMOS.
- Не регламентує необхідність спеціалізованого навчання для інженерів технагляду.
- Не встановлює орган охорони культурної спадщини чи орган містобудівного контролю як замовника технагляду.

Таким чином, задача створення концепції науково-технічного нагляду є актуальною.

Мета і задачі статті. Метою дослідження є розробка концепції науково-технічного нагляду при реставрації пам'яток архітектури та містобудування, що забезпечує системну інтеграцію доктринальних принципів ICOMOS з українським законодавством через запропоновану організаційну модель. Вирішені наступні задачі:

- Аналіз систем контролю за реставрацією на базі стандартів ICOMOS.
- Створення організаційної моделі технічного нагляду в будівництві.
- Розробка пропозицій щодо використання цифрових інструментів контролю в будівництві: на рівні окремого проєкту, місцевого і центрального органу містобудування та саморегульованих організацій.
- Оцінка очікуваних результатів та ризиків втілення концепції науково-технічного нагляду.

Виклад основного матеріалу. Діюча організаційна модель залучення технічного нагляду показана на рис. 1, удосконалена пропозиція – на рис. 2. Таблиця 3 додатково розкриває матрицю ролей та контролю організаційної моделі технічного нагляду за реставрацією пам'яток архітектури й містобудування. Запропонована модель усуває конфлікт інтересів: балансоутримувач замовляє реставрацію, органи охорони спадщини — незалежний технагляд. Така структура змінює ст. 16 Закону №1805-III [7] та Постанову КМУ № 903 [13], забезпечуючи доктринальний контроль за принципами ICOMOS [2-6].

Науково-технічний нагляд за реставрацією пам'яток архітектури й містобудування має отримувати додаткову спеціалізацію за рахунок навчання, наданого спеціалістами, що здійснюють науково-технічний супровід, із дотриманням принципів ICOMOS. Навчання за стандартами ICOMOS гарантує, що інженер технагляду розуміє цінність оригінальної пам’ятки. Це запобігає невиправданій заміні історичних матеріалів сучасними аналогами. Інженер технічного нагляду стає ефективним комунікаційним «мостом» між вченими-реставраторами, які створюють концепцію, та підрядниками, які виконують роботу. Це мінімізує технологічний брак при роботі зі специфічними розчинами, конструкціями чи декором. Крім того, навчений інженер технагляду, маючи прямий зв'язок з науково-технічним супроводом, здатен оперативно ідентифікувати знахідку, що містить культурну цінність, та призупинити роботи на конкретній ділянці до науково обґрунтованого рішення.

Таблиця 2 – Нормативні вимоги до технічного нагляду при реставрації пам'яток архітектури та містобудування

Назва нормативу	Номер пункту	Текст вимоги дослівно
ДСТУ-Н Б В.3.2-4:2016 «Настанова щодо виконання ремонтно-реставраційних робіт на пам'ятках архітектури та містобудування» [10]	П. 1.3 Сфера застосування	Вимоги цього стандарту враховуються при розробленні технології та виконанні виробничих заходів зі збереження об'єктів (пам'яток) нерухомої культурної спадщини з обов'язковим контролем якості робіт.
	П. 4.1 Загальні положення	Виконання робіт із консервації, реставрації, реабілітації, музеєфікації, реставраційного ремонту та пристосування пам'яток здійснюється під науково-технічним супроводом з дотриманням принципів автентичності, мінімального втручання та зворотності.
ДБН А.2.2-14:2016 «Склад та зміст науково-проектної документації на реставрацію пам'яток архітектури» [8]	П. 5.2.3 Технічна документація	Науково-технічний супровід робіт включає контроль за відповідністю виконаних робіт затвердженій проектній документації, фіксацію стану пам'ятки до, під час та після втручань.
Закон України «Про охорону культурної спадщини» № 1805-III [7]	Ст. 16, п. 2	Органи охорони культурної спадщини здійснюють державний нагляд за виконанням робіт на пам'ятках, включаючи перевірку проєктів, хід робіт та приймання об'єктів.
ДБН А.3.1-5:2016 «Організація будівельного виробництва» [11]	П. 8.2.1 Технічний нагляд	Технічний нагляд здійснює замовник або уповноважена особа шляхом перевірки відповідності обсягу, якості, умов і термінів виконання робіт затвердженій проєктно-технічній документації.

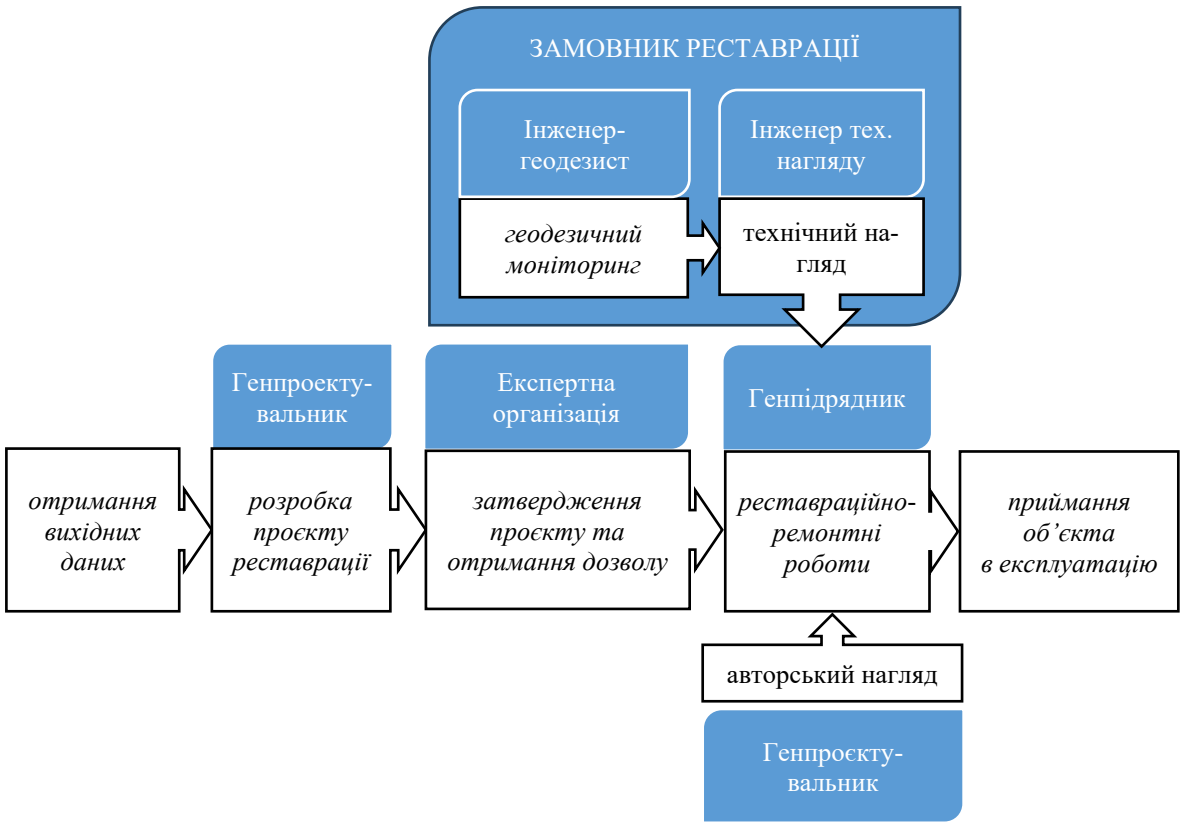


Рис. 1. Чинна модель залучення технічного нагляду

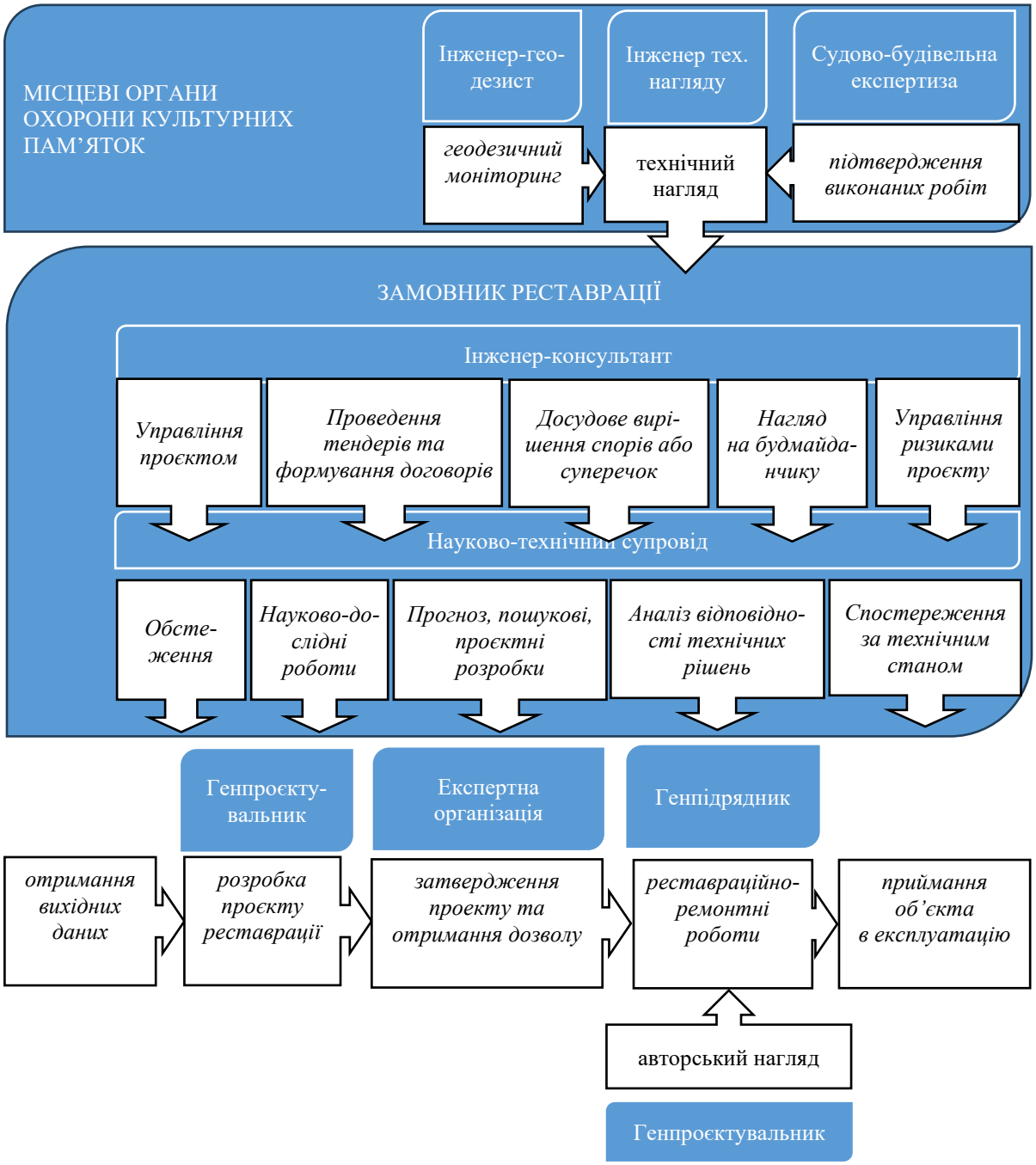


Рис. 2. Організаційна модель залучення технічного нагляду при реставрації пам'яток архітектури та містобудування (удосконалена пропозиція),

Таблиця 3 – Матриця ролей та контролю удосконаленої організаційної моделі технічного нагляду в будівництві

Хто	Роль	Замовник	Контролює	Правова основа
1	2	3	4	5
Органи охорони культурної спадщини	Замовник технагляду	Держава	Незалежний технагляд	Закон №1805-III, ст. 16 [7]
Незалежний технагляд	Дотримання нормативних документів та принципів ICOMOS	Органи охорони культурної спадщини	Замовника та підрядників	Постанова КМУ № 903 [13] (з пропозиціями)

Закінчення табл. 3

1	2	3	4	5
Замовник	Балансоутримувач пам’ятки	Власник/ користувач	Генпроєктувальника та генпідрядника	ДСТУ-Н Б В.3.2-4:2016 [10]
Інженер-консультант	Організатор, технічний керівник реставрації	Замовник		Наказ Мінрегіону №192 [14]
Науково-технічний супровід	Дотримання та принципів ICOMOS			ДБН В 1.2-5:2007 [15]
Генпроєктувальник та генпідрядник	Виконавець		Субпідрядники	ДБН А.3.1-5:2016 [15]

Впровадження концепції науково-технічного нагляду може призвести до ряду ускладнень. Обов'язкове додаткове навчання інженерів технагляду, залучення спеціалістів з науково-технічного супроводу та застосування повільніших консерваційних технологій збільшують кошторис та тривалість реалізації проєкту. Інженер технічного нагляду, навчений за принципами ICOMOS, вступатиме у суперечки із замовником. Балансоутримувач пам’ятки переважно прагне максимальної комерційної адаптації об'єкта, тоді як науковий підхід вимагає мінімального втручання. Без потужного інституційного захисту такий інженер технагляду буде швидко усунутий замовником.

Гарантії незалежності моделі забезпечуються чотирма рівнями правового та організаційного розмежування:

1. Подвійне замовлення (ключовий принцип). Незалежність моделі забезпечується подвійним замовленням: балансоутримувач фінансує реставрацію, органи охорони спадщини – технагляд. Постанова КМУ № 903 [13] прямо дозволяє замовнику (органу влади) залучати незалежних інженерів із кваліфікаційним сертифікатом, не пов'язаних з підрядником. Як результат, технагляд не залежить фінансово від замовника робіт.

2. Юридична кваліфікація. Тільки особи з кваліфікаційним сертифікатом інженера технічного нагляду можуть здійснювати контроль. Сертифікат видається на 5 років, з перевіркою відсутності конфлікту інтересів. Заборонено одночасне виконання функцій технагляду та виконання будівельних робіт.

3. Функціональна автономія. Технагляд відповідно до нормативних вимог має право зупиняти роботи, вимагати усунення недоліків, відмовляти у прийнятті робіт.

4. Цифровий громадський контроль. Цифрові інструменти створюють "скляну скриньку" (табл. 4): BIM-модель фіксує втручання, IoT-сенсори моніторять стан конструкцій у реальному часі, а відкриті звіти в ЄДЕССБ забезпечують громадський контроль. Такий підхід забезпечує принципи ICOMOS — автентичність, зворотність, прозорість.

Основними нормативно-правовими актами, що регулюють впровадження BIM (будівельного інформаційного моделювання), є наступні:

− Постанова КМУ № 152-р від 17.02.2021 «Про схвалення Концепції впровадження технологій будівельного інформаційного моделювання (BIM-технологій) в Україні та затвердження плану заходів з її реалізації» [16].

− Постанова КМУ № 909 від 9 серпня 2024 р. (із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ № 1557 від 31.12.2024) «Деякі питання реалізації експериментального проєкту щодо запровадження Містобудівного кадастру на державному рівні» [17].

− Проєкт Містобудівного кодексу України [18].

Відповідно до цих документів, концепція цифрового контролю за містобудівною діяльністю, включно з реставрацією пам’яток архітектури та містобудування, виглядає згідно з табл. 5. Концепція за табл. 5 відповідно до організаційної моделі залучення технічного нагляду при реставрації пам'яток архітектури виглядає наступним чином. Містобудівний кадастр на державному рівні забезпечує контроль контексту за Вашингтонською хартією: супутникові знімки автоматично порівнюються з затвердженим генеральним планом, виявляючи порушення історичного силуету чи буферних зон. Електронний кабінет може

скоротити погодження з 90 днів до тижня – дозвіл Мінкульту, МУО можуть отримуватися автоматично, усуваючи "адміністративні затримки" як корупційний фактор.

Цифрова експертиза через BIM забезпечує автоматизацію перевірки відповідності проєкту ДБН та принципам ICOMOS: модель завантажується в систему, алгоритм видає звіт про розбіжностей, наприклад, від неправильних армуючих матеріалів до порушень історичних пропорцій. Це скорочує експертизу, усуваючи людський фактор та корупційні схеми.

BIM-моделі з рівнями деталізації LOD 300–500 створюють цифровий двійник пам'ятки архітектури та містобудування, де кожен карниз, капітель чи тріщина фіксується з точністю до сантиметра, дозволяючи технагляду відстежувати кожен шар втручань у реальному часі. Порівнюючи стан "до" та "після" реставрації, інженер виявляє заміну автентичного елемента сучасним аналогом, а розшифровка кольорів та матеріалів у LOD 400 гарантує зворотність втручань — ключовий принцип Венеційської хартії. Роль інженера технагляду в такому разі стає ключовою: він підтверджує відповідність відреставрованої пам’ятки цифровій моделі. За рахунок відповідальності, зафіксованої особовим кабінетом атестованої особи, публічний контроль за реставрацією стає більш ефективним.

Інтеграція з ЄДЕССБ перетворює технагляд на прозорий процес: щотижневі звіти можуть автоматично оновлювати BIM-модель, акти прихованих робіт можуть містити геоприв'язані фото з QR-кодами, історія змін зберігається у форматі IFC, із підтвердженням достовірності відповідальною особою – сертифікованим фахівцем технічного нагляду. Кожен виконавець може бачити, що його робота контролюється не лише інженером технагляду, а й системою з публічним доступом.

Таблиця 4 – Цифрові інструменти контролю реставрації пам’яток архітектури та містобудування

Інструмент	Функція	Рівень контролю	Формат
BIM/цифровий двійник	Візуалізація втручань, фіксація автентичності	Проєктний етап + щомісяця	IFC + OpenBIM
IoT-сенсори	Моніторинг вологості, деформацій конструкцій	Онлайн, 24/7	API → ЄДЕССБ
Дрони + фотограмметрія	Фіксація стану фасадів/покриттів	Щотижня	3D-моделі
Хмарний журнал робіт	Цифровий акт виконаних/ прихованих роботи	Щодня	PDF/A + XML
ШІ-аналітика	Прогнозування ризиків недотримання нормативних документів та принципів ICOMOS	Щотижня	Dashboard

Таблиця 5 – Концепція цифрового контролю за містобудівною діяльністю [18]

Інструмент	Опис	Рівень контролю
Концепція Містобудівного кодексу		
Містобудівний кадастр на держрівні	Інтегрована ГІС з Реєстром містобудівної документації, автоматична валідація проєктів	Центральний орган, ЄДЕССБ
Електронний кабінет	Автоматизоване погодження МУО, ДІАМ, експертиза в цифровому форматі	Місцевий/ центральний
Містобудівний моніторинг	Автоматичний аналіз відповідності забудови генеральним планам через супутникові дані	Центральний орган
Інтеграція з земельним кадастром	Автоматичний обмін геоданими для перевірки меж ділянок	Місцевий рівень
Концепція впровадження BIM		
BIM-моделі (LOD 300-500)	3D-модель з параметрами матеріалів, конструкцій, життєвого циклу (LCC)	Окремий проєкт
Цифрова експертиза	Автоматична перевірка відповідності ДБН через BIM-валідатори	Центральний орган
ЄДЕССБ + BIM	Інтеграція цифрових моделей у декларації ДІАМ, технагляд	Всі рівні
ГІС-інтеграція	BIM поєднаний з містобудівним кадастром для моніторингу забудови	Місцевий/ центральний

Містобудівний моніторинг через супутникові дані та AI сканує об'єкти щомісяця, виявляючи самовільні втручання чи відхилення від проєкту. Як приклад, це може виглядати наступним чином: Heritage BIM-модель фіксує автентичні ліпнини, IoT-сенсори 24/7 моніторять деформації карниза, дрон створює щотижневі 3D-моделі фасаду, акти з QR-кодами публікуються в ЄДЕССБ, а МБКД перевіряє відповідність одеському історичному ареалу. Процес технічного нагляду переходить від паперових журналів до повного цифрового контролю, де кожна деталь відповідає принципам ICOMOS, корупційні ризики знижуються, а якість робіт зростає.

Запропонована організаційна модель (рис. 2) трансформує систему технічного нагляду за реставрацією пам'яток архітектури та містобудування, усуваючи системні недоліки чинної моделі. Таким чином, вперше розроблена системна концепція «науково-технічного нагляду» як багатокомпонентної інституційної структури, що інтегрує:

1. Доктринальні принципи ICOMOS (автентичність, мінімальне втручання, зворотність) з технологічними вимогами ДСТУ-Н Б В.3.2-4:2016 [10].

2. Подвійне замовлення: замовник (балансоутримувач пам’ятки) відповідає за реставрацію, органи охорони спадщини – за належний технагляд.

Алгоритм впровадження концепції науково-технічного нагляду при реставрації пам’яток архітектури може виглядати наступним чином:

1. Нормативно-правове поле (6 місяців): Закріплення моделі законодавчо через зміни до Закону № 1805-III [7]. Наказ Мінкульту створює Реєстр акредитованих інженерів технагляду у сфері реставрації. Зміни до Постанови КМУ № 903 [13] вводять "реставрацію" як окремий вид робіт з обов'язковим цифровим звітом. Розробляється пілотний стандарт Heritage BIM для пам'яток.

2. Пілотне тестування (12 місяців): Реставрація 10 пам'яток у Києві, Львові, Одесі, Чернігові. Розгортання BIM-моделей + IoT-сенсорів для моніторингу деформацій. Публікація щотижневих звітів у ЄДЕССБ з відкритим доступом. Аналіз результатів публічного контролю.

3. Масштабування (24 місяці): Обов’язкова реставрація всіх пам’яток відповідно до концепції. Повна інтеграція Містобудівного кадастру з ЄДЕССБ. Програма перекваліфікації 200 інженерів через КНУБА, ЛНУ, ОДАБА тощо.

4. Інституціоналізація (36 місяців): Створення Державного центру технагляду при Мінкульті. Відкриті API (Application Programming Interface) для громадськості.

Можливі ризики впровадження концепції та методи реагування на них показані у табл. 6.

Таблиця 6 – Ризики впровадження концепції науково-технічного нагляду при реставрації пам’яток архітектури та методи реагування

Ризик	Ймовірність	Наслідки	Заходи реагування
Опір балансоутримувачів	Висока	Затримка впровадження	Компенсація 50 % вартості технагляду на пілотних об'єктах
Дефіцит кадрів	Висока	Низька якість контролю	Спільна програма ЗВО та Мінкульту (200 фахівців за 2 роки)
Технічні збої BIM	Середня	Некоректна звітність	Сертифікація програмного забезпечення та резервні паперові журнали
Корупція при акредитації	Середня	Втрата довіри	Публічний реєстр з ротацією інженерів технагляду кожні 2 роки
Недофінансування	Низька	Часткове покриття	0,5 % від кошторису реставрації спрямовується у спецфонд Мінкульту для підтримки концепції

Висновки.

1. Відповідно до стандартів ICOMOS, ключовими є принципи автентичності, мінімального втручання, зворотності та поваги до історичних нашарувань пам'ятки. Контроль передбачає опору на наукові дослідження, фіксацію первісного стану, використання традиційних матеріалів і технологій, а також врахування контексту середовища.

2. Організаційна модель технічного нагляду в будівництві показує переваги здійснення науково-технічного контролю на замовлення місцевих органів охорони культурної спадщини. Результатом запровадження такої моделі є підвищення ефективності технічного нагляду та більш ретельне додержання рекомендацій стандартів ICOMOS.

3. Використання цифрових інструментів контролю в будівництві включає: BIM/цифрові двійники, IoT-сенсори, дрони, мобільні інспекційні платформи, хмарні системи управління документацією та аналітику даних за допомогою штучного інтелекту. Всі ці інструменти доцільно декомпозувати до використання на рівні окремого проєкту, місцевого і центрального органу містобудування та саморегульованих організацій.

4. Незалежний технічний нагляд за підтримки місцевих органів охорони культурної спадщини, а також при використанні цифрових інструментів контролю в будівництві дозволить суттєво підвищити прозорість та керованість у сфері реставрації пам'яток архітектури та містобудування в Україні. Надалі цю систему можливо масштабувати для будь-яких будівельних проєктів.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті.

Під час написання цього матеріалу автор(и) використовували Gemini 3 PRO – для пошуку та аналізу інформаційних джерел з теми дослідження. Після використання цього інструменту/сервісу автори переглянули та відредагували зміст за потреби і взяли на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Мазур, Т. В. (2020). Нормотворча діяльність міжнародної ради з питань пам'яток і визначних місць у сфері захисту світової культурної спадщини. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Юридичні науки, 1*, 32–36. https://doi.org/10.32838/2707-0581/2020.1/06.

2. International Council on Monuments and Sites (ICOMOS). (1964). *Міжнародна хартія з консервації та реставрації пам'яток і визначних місць (Венеційська хартія)*. https://admin.icomos.org/wp-content/uploads/2025/03/Venice_Charter_UK.pdf.

3. International Council on Monuments and Sites (ICOMOS). (1981). *Флорентійська хартія щодо збереження історичних садів*. https://admin.icomos.org/wp-content/uploads/2023/01/gardens_e.pdf.

4. International Council on Monuments and Sites (ICOMOS). (1987). *Вашингтонська хартія щодо охорони історичних міст і міських територій*. https://admin.icomos.org/wp-content/uploads/2023/01/towns_e.pdf.

5. International Council on Monuments and Sites (ICOMOS). (2003). *Хартія ICOMOS про принципи аналізу, консервації та реставрації конструкцій архітектурної спадщини*. https://admin.icomos.org/wp-content/uploads/2023/01/structures_e.pdf.

6. International Council on Monuments and Sites (ICOMOS). (1999). *Міжнародна хартія традиційного будівництва*. https://admin.icomos.org/wp-content/uploads/2023/01/vernacular_e.pdf.

7. Верховна Рада України. (2006). *Закон України «Про охорону культурної спадщини» № 1805-IV від 8 червня 2006 року (зі змінами)*. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1805-14.

8. Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. (2016, 1 лютого). *ДБН А.2.2-14:2016. Склад та зміст науково-проєктної документації на реставрацію пам'яток архітектури та містобудування (зі змінами № 1)*. https://e-construction.gov.ua/files-token/6cc84cf033515fb0913145826008cbca.

9. Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. (2014, 3 червня). *ДБН А.2.2-3:2014. Склад та зміст проєктної документації на будівництво (зі змінами)*. https://e-construction.gov.ua/files-token/1b9965d56515802e6fc36b89236a323e.

10.Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. (2016, 21 червня). *ДСТУ-Н Б В.3.2-4:2016. Настанова щодо виконання ремонтно-реставраційних робіт на пам'ятках архітектури та містобудування*. http://kyiv-heritage.com/sites/default/files/D0%92.3.2-4%202016%20%96.pdf.

11.Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. (2016, 29 червня). *ДБН А.3.1-5:2016. Організація будівельного виробництва*. https://e-construction.gov.ua/files-token/c33fe4635e1c0f42b3b3a9a457578bc6

12.Міністерство культури та інформаційної політики України. (2020). *Методичні рекомендації щодо виконання вимог законодавства з охорони культурної спадщини при поводженні з пам'ятками архітектури*. https://mindev.gov.ua/storage/app/sites/1/uploaded-files/metodicni-rekomendaciyi-po-kultunii-spadshhini.pdf

13.Кабінет Міністрів України. (2007, 11 липня). *Постанова № 903 «Про авторський та технічний нагляд під час будівництва об'єкта архітектури»*. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/903-2007-%D0%BF.

14.Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. (2017, 8 серпня). *Наказ № 192 «Про внесення змін до Довідника кваліфікаційних характеристик професій працівників. Випуск 64 "Будівельні, монтажні та ремонтно-монтажні роботи"»*. https://www.gitn.org.ua/images/nakaz-192.pdf.

15.Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України. (2007, 5 квітня). *ДБН В.1.2-5:2007. Науково-технічний супровід будівельних об'єктів*. https://e-construction.gov.ua/files-token/baeaea673a5d6a69936aa69d49b53ad4.

16.Кабінет Міністрів України. (2021, 17 лютого). *Розпорядження № 152-р «Про схвалення Концепції впровадження технологій будівельного інформаційного моделювання (BIM-технологій) в Україні та затвердження плану заходів з її реалізації»*. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/152-2021-%D1%80.

17.Кабінет Міністрів України. (2024, 9 серпня). *Постанова № 909 «Деякі питання реалізації експериментального проєкту щодо запровадження Містобудівного кадастру на державному рівні»*. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/909-2024-%D0%BF.

18.Бондар, Г. В. (2024). *Концепція Містобудівного кодексу України*. Комітет з питань державної влади, місцевого самоврядування, регіонального розвитку та містобудування Верховної Ради України. https://komsamovr.rada.gov.ua/uploads/documents/44618.pdf.

References

1. Mazur T.V. (2020). Normotvorcha diialnist mizhnarodnoi rady z pytan pamiatok i vyznachnykh mists u sferi zakhystu svitovoi kulturnoi spadshchyny [International norm-setting activity for the sake of nourishing reminders and important places in the sphere of protecting the world's cultural decline]. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriia: yurydychni nauky – Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Juridical Sciences*, *31*(1), 32–36. https://doi.org/10.32838/2707-0581/2020.1/06.

2. International Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Significant Places (Venice Charter). (1964). ICOMOS, URL: https://admin.icomos.org/wp-content/uploads/2025/03/Venice_Charter_UK.pdf.

3. Florentine Charter for the preservation of historical gardens. (1981). ICOMOS, URL: https://admin.icomos.org/wp-content/uploads/2023/01/gardens_e.pdf.

4. Washington Charter for the Protection of Historic Places and Municipal Territories. (1987). ICOMOS, URL: https://admin.icomos.org/wp-content/uploads/2023/01/towns_e.pdf.

5. ICOMOS Charter on the principles of analysis, conservation and restoration of architectural structures. (2003). ICOMOS, URL: https://admin.icomos.org/wp-content/uploads/2023/01/structures_e.pdf.

6. International Charter of Traditional Life. (1999). ICOMOS, URL: https://admin.icomos.org/wp-content/uploads/2023/01/vernacular_e.pdf.

7. Verkhovna Rada of Ukraine. (2006). Pro okhoronu kulturnoi spadshchyny [On the Protection of Cultural Heritage], Law of Ukraine No. 1805-IV of June 8, 2006 (as amended)]. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1805-14#Text.

8. DBN A.2.2-14:2016. Sklad ta zmist naukovo-proektnoi dokumentatsii na restavratsiiu pamiatok arkhitektury ta mistobuduvannia [State Building Code A.2.2-14:2016. Warehouse and storage of scientific and design documentation for the restoration of monuments of architecture and place (with changes No. 1)], Order to the Ministry of Regional Development of Ukraine No. 31 (2016, February 1). https://e-construction.gov.ua/files-token/6cc84cf033515fb0913145826008cbca.

9. DBN A.2.2-3:2014. Sklad ta zmist proektnoi dokumentatsii na budivnytstvo [State Building Code A.2.2-3:2014. Warehouse and storage of design documentation for everyday life (with changes)], Order to the Ministry of Regional Development of Ukraine No. 147 (2014, June 03). https://e-construction.gov.ua/files-token/1b9965d56515802e6fc36b89236a323e.

10. DSTU-N B V.3.2-4:2016. Nastanova shchodo vykonannia remontno-restavratsiinykh robit na pamiatkakh arkhitektury ta mistobuduvannia [State Standard of Ukraine N B V.3.2-4: 2016. It is now time to begin repair and restoration work on architectural monuments and places], Order to the Ministry of Regional Development of Ukraine No. 174 (2016, June 21). http://kyiv-heritage.com/sites/default/files/D0%92.3.2-4%202016%96.pdf.

11. DBN A.3.1-5:2016. Orhanizatsiia budivelnoho vyrobnytstva [State Building Code A.3.1-5:2016. Organization of daily production. Order to the Ministry of Regional Development of Ukraine No. 192]. (2016, June 29). https://e-construction.gov.ua/files-token/c33fe4635e1c0f42b3b3a9a457578bc6.

12. Metodychni rekomendatsii shchodo vykonannia vymoh zakonodavstva z okhorony kulturnoi spadshchyny pry povodzhenni z pamiatkamy arkhitektury [Guidelines on compliance with cultural heritage legislation when dealing with architectural monuments]. (2020). Ministry of Culture of Ukraine/ https://mindev.gov.ua/storage/app/sites/1/uploaded-files/metodicni-rekomendaciyi-po-kultunii-spadshhini.pdf.mindev.

13. Pro avtorskyi ta tekhnichnyi nahliad pid chas budivnytstva obiekta arkhitektury [On design supervision and technical supervision during the construction of a building], Resolution to the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 903 (2007, June 11). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/903-2007-%D0%BF#Text.

14. Pro vnesennia zmin do Dovidnyka kvalifikatsiinykh kharakterystyk profesii pratsivnykiv Vypusk 64 «Budivelni, montazhni ta remontno-montazhni roboty» [About making changes to the Certificate of Qualification Characteristics of the Profession of Practitioners Issue 64 “Building, installation and repair and installation robots], Order of the Ministry of Regional Development, Activities and Housing and Communal Administration of Ukraine No. 192 (2017, September 08). https://www.gitn.org.ua/images/nakaz-192.pdf.

15. DBN V 1.2-5:2007. Naukovo-tekhnichnyi suprovid budivelnykh obiektiv. Nakaz Minbudu Ukrainy vid 05.04.2007 r. № 119. [State Building Code V 1.2-5: 2007. Scientific and technical support of future projects. Order to the Ministry of Health of Ukraine No. 119.] (2007, April 04). https://e-construction.gov.ua/files-token/baeaea673a5d6a69936aa69d49b53ad4.

16. Pro skhvalennia Kontseptsii vprovadzhennia tekhnolohii budivelnoho informatsiinoho modeliuvannia (BIM-tekhnolohii) v Ukraini ta zatverdzhennia planu zakhodiv z yii realizatsii [“On the praise of the Concept for the development of advanced information modeling technologies (BIM technologies) in Ukraine and the approval of the plan for approaching them implementation], Resolution of the Cabinet of Ministers No. 152-r (2021, February 17). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/152-2021-%D1%80#Text.

17. Deiaki pytannia realizatsii eksperymentalnoho proektu shchodo zaprovadzhennia Mistobudivnoho kadastru na derzhavnomu rivni [“Activities for the implementation of an experimental project to promote the local cadastre on the sovereign level]. Resolution of the Cabinet of Ministers No. 909 (2024, September 9). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/909-2024-%D0%BF.

18. Bondar, H. V. (2024). *Kontseptsiia Mistobudivnoho kodeksu Ukrainy. Komitet z pytan derzhavnoi vlady, mistsevoho samovriaduvannia, rehionalnoho rozvytku ta mistobuduvannia Verkhovnoi Rady Ukrainy [Concept of the Local Code of Ukraine. Committee for the nourishment of sovereign power, local self-government, regional development and locality of the Supreme Council of Ukraine]*. (2024). https://komsamovr.rada.gov.ua/uploads/documents/44618.pdf.

Дата першого надходження статті до видання: 19.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.01.2026

UDC 69.055 : 004.9

Anatolii Kovrov[1], Telman Marchenko[2]

[1]PhD in Engineering Sciences, Professor, Rector
Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture (Odesa, Ukraine)
E-mail: rector@ogasa.org.ua. **ORCID**: https://orcid.org/0000-0001-9408-3246

[2]PhD Candidate
Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture (Odesa, Ukraine)
E-mail: t9400354@gmail.com. **ORCID**: https://orcid.org/0009-0001-0687-7909

CONCEPT OF INDEPENDENT TECHNICAL SUPERVISION FOR RESTORATION OF ARCHITECTURAL MONUMENTS AND URBAN PLANNING

Post-war recovery of more than 7,800 Ukraine's architectural monuments necessitates a radical transformation of technical supervision. Existing regulatory frameworks assign oversight to the customer, creating a systemic conflict of interest and contradicting international ICOMOS principles of authenticity. Establishing a neutral, expert-driven oversight mechanism is crucial for preserving cultural identity and ensuring the efficient use of international and state funds during reconstruction.

The problem addressed is the lack of a specialized, independent technical supervision institution tailored for heritage restoration. Current practices treat restoration as general construction, failing to account for the multidisciplinary nature of preservation. This doctrinal gap between international charters and national standards allows for the loss of historical features and financial mismanagement, necessitating a shift toward scientifically grounded restoration.

The research objective is to develop a comprehensive concept of independent technical supervision that harmonizes ICOMOS principles with Ukrainian legislation. The study aims to achieve systematic integration of international doctrines into the national regulatory environment through a proposed "dual ordering" model and digital control tools. The goal is to provide a framework for neutral oversight, corruption risk reduction, and efficient budget management.

The basic materials focus on the "dual ordering" model, where heritage protection authorities act as the primary client for supervision, ensuring independence from contractors. The methodology incorporates BIM (LOD 300–500) for "digital twins", IoT sensors for real-time monitoring, and drone photogrammetry. Integration into the Unified State Electronic System (EDESB) ensures transparency through unforgeable digital reports and QR-coded documentation.

Conclusions provide a systematic justification for independent oversight, integrating ICOMOS doctrine with digital governance. Practical application is expected to save 450 million UAH annually and reduce supervision time by 50% via automation. The 4-stage implementation algorithm ensures the preservation of authentic historical substance and aligns national practices with global excellence standards.

Keywords: *independent technical supervision, restoration of monuments, ICOMOS, BIM, digitalization, cultural heritage, scientific and technical support.*

Table: 6. Fig.: 2. References: 18.

Ковров А. В., Марченко Т. І. Концепція науково-технічного нагляду при реставрації пам'яток архітектури та містобудування. *Технічні науки та технології*, 2026. № 1(43). С. 402-414. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-402-414.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-415-429
УДК 528.83

Сергій Дмитрович Крячок[1], Олексій Іванович Терещук[2]

[1]кандидат технічних наук, доцент
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: geodesist2015@gmail.com. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0001-5633-1501
ResearcherID: N-3061-2016. **SCOPUS Author ID:** 57204332476

[2]кандидат технічних наук, доцент
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: olexter1957@gmail.com. **ORCID** orcid.org/0000-0001-6433-9351
ResearcherID: http://www.researcherid.com/rid/H-4540-2016. **SCOPUS Author ID:** 57211315791
GoogleScholar: https://scholar.google.com/citations?view_op=list_works&hl=ru&user=vZtF4YIAAAAJ
https://scholar.google.com.ua/citations?user=vZtF4YIAAAAJ&hl=uk&citsig=AMstHGRJW5NzJv81Vio_Xp9rgjtO_Wm2GA
IndexCopernicus: http://journals.indexcopernicus.com/+++,p24781806,3.ht

СИСТЕМА КАРТОГРАФУВАННЯ ТЕРИТОРІЇ РАДІАЦІЙНОГО ЗАБРУДНЕННЯ НА ПЛАТФОРМІ БПЛА

У статті розглянуто вдосконалену систему картографування територій радіаційного забруднення з використанням безпілотних літальних апаратів коптерного типу. Запропонований підхід поєднує повітряне гамма-зондування з низьких висот, створення актуальної ортофотокартографічної основи та маркування зон підвищеного радіаційного фону безпосередньо з борту БПЛА. Застосування модульної структури обладнання, механізму спуску детектора та уточнених висотних і метеорологічних поправок дозволяє підвищити точність і достовірність результатів, наблизивши їх до наземних вимірювань, а також зменшити ризики опромінення персоналу під час радіаційного моніторингу

Ключові слова: *безпілотні літальні апарати; гамма-зондування; дистанційне зондування Землі.*
Рис.: 3. Бібл.: 27.

Актуальність теми дослідження. Впродовж останніх десятиліть спостерігається бурхливий розвиток автоматизованих систем, що покликані полегшити виконання виробничих, рутинних завдань [1]. Наразі автоматизовані системи знайшли свій розвиток у безпілотних апаратах (БА). Наземні БА використовуються для прибирання квартир та подвір'я, у сільському господарстві – для точного землеробства, огляду полів, доставки матеріалів на ферму [2; 3]. У військовій сфері наземні БА використовуються для ведення розвідки, мінування, доправлення до позицій боєкомплектів, транспортування поранених із поля бою [4].

Серед БА найбільш масово використовуються безпілотні літальні апарати (БПЛА). У сільському господарстві за допомогою БПЛА виконується моніторинг стану сільськогосподарських угідь, оперативна оцінка стану земель, прогноз врожайності [5; 6]. БПЛА знайшли застосування в лісовому господарстві – для визначення характеристик деревостою, пошуку місць займання, виявлення місць незаконної вирубки дерев, виявлення та запобігання випадкам браконьєрства [7]. Аерознімання територій та лінійних об'єктів виконується також за допомогою БПЛА [8]. БПЛА залучаються до пошуку та картографування мінних полів [9].

Сьогодні спостерігається загрозлива тенденція розповсюдження ядерної зброї, її розміщення на нових територіях, небезпека пошкодження та підриву ядерних реакторів і руйнування місць зберігання радіоактивних відходів. Такі дії можуть викликати радіаційне забруднення значних територій. Тому актуальним питанням є вдосконалення систем картографування територій радіаційного забруднення на платформах БПЛА з метою ухвалення своєчасних та адекватних управлінських рішень для локалізації негативних наслідків.

Постановка проблеми. Картографування територій радіаційного забруднення входить у задачі радіаційного моніторингу довкілля [10]. Повітряні системи радіаційного моніторингу у своїй більшості призначені на виявлення саме гамма-випромінювання. Це пов'язано з тим, що гамма-випромінювання є найбільш проникним серед інших видів радіоактивного випромінювання [11].

© С. Д. Крячок, О. І. Терещук, 2026

У минулому як платформу для повітряного гамма-зондування використовували літаки та гелікоптери. Висота польоту складала приблизно 150 м над середнім рівнем місцевості, а швидкість сягала 60 м/с [12]. Однак відомо, що роздільна здатність повітряного гамма-зондування безпосередньо залежить від висоти польоту над земною поверхнею, швидкості польоту й контрасту між фоновим випромінюванням і локалізованими джерелами [13]. Завдяки меншим швидкостям та здатності тримати низькі висоти польоту БПЛА дозволяють значно підвищити роздільну здатність радіаційного зондування. Крім того, виготовлення, приладове наповнення та експлуатація БПЛА мають значно меншу вартість у порівняні з літаками та гелікоптерами. [14]. Людство має досвід практичного застосування БПЛА для виконання гамма-зондування. Так, ці платформи використовувались для розвідки витоку радіації внаслідок цунамі на атомній станції Фукусіма у Японії [15]. Для пошуку та картографування місць захоронення ядерних відходів навколо Чорнобильської АЕС було успішно застосовано систему дистанційного радіаційного моніторингу на платформі БПЛА [16]. Елементна база та конструкція БПЛА постійно удосконалюються [17]. Покращуються навігаційні спроможності позиціонування в реальному часі й розробки технологій утримання повітряної платформи на заданому курсі [18].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для проведення радіаційного моніторингу застосовують БПЛА літакового і коптерного типів. Так, у роботі [19] наведено опис системи повітряного гамма-картографування на платформі БПЛА вертикального злету і посадки з фіксованим крилом. Дослідження виконуються з висоти 70 м над місцем злету зі швидкістю 15 м/с та інтервалом між галсами 20 м. На борту БПЛА знаходиться система керування польотом, GPS-приймач, LiDAR, система виявлення та класифікації гамма-випромінювання на основі сцинтилятора CsI(Tl) і напівпровідникового детектора CZT та блок живлення. Радіологічні дані зберігаються і передаються через стільниковий зв'язок на наземну станцію опрацювання даних. Виміряні інтенсивності перетворюються в потужності еквівалентної дози. Для цього використовуються функції перетворення дози, отримані за допомогою коду моделювання Монте-Карло. Значення дози корегуються за різницю висот за виміряними висотами та враховують ослаблення випромінювання повітрям і приводяться до стандартного значення температурою і тиску для виявлених енергій фотонів та перераховуються до висоти 1 м над земною поверхнею. Візуалізація оброблених даних виконується в програмі ArcGIS Pro з інтерполяцією радіометричних даних за допомогою інструменту - емпіричний баєсівський кригінг. План польоту попередньо визначається пілотом за допомогою програми, встановленої на планшеті, що постачається разом з БПЛА.

У статті [20] наведено опис системи з використанням платформи БПЛА коптерного типу. Система призначена для ідентифікації природних радіонуклідів. На борту БПЛА знаходяться: сцинтиляційні детектори на основі CeBr3 та NaI; система GNSS-позиціонування; інерційний вимірювальний блок; компас; лазерний віддалемір; давачі температури й тиску; камера з видом від першої особи; система зв’язку для керування БПЛА; універсальна система мобільного зв'язку (UMTS) 4G/3G/2G – для передачі частини зашифрованих даних на наземну станцію; карта пам’яті; блок живлення. Для дослідження природних радіонуклідів у випадку рівнинної та не залісненої місцевості висота польоту складає 10 м. Швидкість польоту платформи 3 м/с. Для покращення якості вимірювань БПЛА може зависати над «гарячими» точками. Відстань між галсами приймається рівною 10 м. Мала висота гамма-зондування в такому випадку пов’язана з низьким рівнем радіоактивності, що зустрічається на територіях колишнього видобутку уранової руди – на відміну від значних рівнів, характерних для радіоактивних осадів після радіологічних і ядерних аварій. Калібрування детекторів за енергіями має свої

особливості Сцинтиляційний детектор на основі CeBr3 об'ємом 700 см^3 забезпечує досить високу швидкість підрахунку, що покращує статистику. Це особливо важливо для виявлення слабких джерел гамма-випромінювання. Детектор відкалібрований на калібрувальній установці Medusa "Stonehenge". У результаті отримують файл калібрування Medusa (MCF), який можна використовувати в програмному забезпеченні для спектрального аналізу та виконувати автоматично енергетичне калібрування. Детектор на основі йодиду натрію NaI об'ємом 350 см^3 призначений для виявлення потужних джерел гамма-випромінювання. Його доводиться калібрувати вручну після кожної заміни батарей живлення. Для цього використовують еталонний зразок хлориду калію KCl. Калібрування ефективності детекторів виконане на калібрувальних майданчиках, які мають квадратні плити розміром сторони 20 м з еталонними значеннями радіоактивності [20].

Опрацювання результатів гамма-зондування територій виконується з використанням персонального комп'ютера за отриманими даними каналом зв'язку та з карти пам'яті. Питома активність радіонуклідів розраховується за алгоритмом, який містить аналітичну модель для прогнозування радіаційного сліду за різною висотою. Результати розрахунків уточнюються моделюванням Монте-Карло - для прогнозування інтенсивності та форми спектрів гамма-випромінювання як функції висоти. Для інтерполяції результатів гамма-зондування застосовується метод сплайн-інтерполяції з використанням контурної картографічної основи Google Earth. У підсумку створюються карти, на яких зміна концентрації природної радіоактивності відповідає зміні кольору її відображення [20].

Інформацію стосовно системи виявлення джерел гамма-випромінювання на платформі БПЛА коптерного типу наведено в роботах [19]. До складу повітряного компонента входять: детектор гамма-випромінювання; аналогово-цифровий перетворювач; модуль керування: модуль зв'язку з наземною станцією; давач температури – для стабілізації напруги живлення; GPS-модуль; карта пам'яті; блок живлення. Детектор гамма-випромінювання виготовлено на основі йодиду цезію CsI(Tl) розміром 10×10×40 мм. До системи виявлення гамма-випромінювання може бути підключено кілька детекторів, що забезпечує статистичну достовірність підрахунку та покращує ідентифікацію джерел. Дозиметрична й координатна інформація щосекунди передається на наземний сегмент системи радіоканалом на частоті 2,4 ГГц у зашифрованому вигляді. На наземному сегменті виконується декодування сигналу та опрацювання інформації. За допомогою графічного інтерфейсу наземної станції виконується побудова спектрів радіонуклідів з їх координатною прив'язкою. Це дозволяє виявити природу джерела гамма-випромінювання та встановити його місцеположення. Енергетичне калібрування системи детектування було виконано з використанням каліброваних джерел гамма-випромінювачами: ^{137}Cs, ^{60}Co, ^{241}Am.

Систему віддаленого радіаційного моніторингу представлено в роботі [19]. На платформі БПЛА у вигляді октокоптера знаходиться сегмент керування польотом та сегмент дистанційного зондування GR-Smart. До складу першого сегмента входять: блоки ручного керування та автоматичного керування; давачі швидкості та напрямку польоту, орієнтації у просторі; обладнання каналу зв'язку з наземним сегментом; блок операційного контролю; блок живлення. Сегмент дистанційного зондування GR-Smart містить: спектрометр з п'яти детекторів на основі йодиду натрію NaI (T1); GPS-приймач; давачі температури повітря, тиску та висоти; Wi-Fi для передачі даних на наземний сегмент; карту пам'яті; блок операційного контролю. Результати вимірів від кожного з п'яти детекторів синхронізується та реєструються як від одного комплексного детектора. Наземний сегмент складається з блоку отримання даних від GR-Smart, блоку попередньої обробки, бази даних, блоків робочого та дистанційного контролю, який

через канал радіозв'язку передає команди на сегмент керування польотом та отримує інформацію від нього. Наземний сегмент виконує опрацювання даних, відновлення спектрів радіонуклідів, на основі чого визначаються потужності дози наземного гамма-випромінювання та його якісний склад, координати джерел гамма-випромінювання. Це дозволяє виявити локальні зони радіоактивного випромінювання, побудити контурні карти розподілу гамма-випромінювання на земній поверхні у масштабі 1:10000.

Калібрування підсистеми GR-Smart було виконано на калібрувальному майданчику, розташованому на території Чорнобильської зони відчуження. Для цього спочатку на території майданчика були проведені наземні вимірювання активності наявних радіонуклідів, для яких будуть виконуватись подальші обстеження. Потім з борту БПЛА на висоті 10 м були виміряні інтенсивності гамма-випромінювання та визначені масиви параметрів калібрування. Повітряне гамма-знімання полишених ядерних могильників на території Чорнобильської зони з висоти 30 м зі швидкості 2,8 м/с було успішно виконано [19].

Виділення недосліджених раніше частин загальної проблеми. У результаті аналізу останніх досліджень і публікацій можна виділити такі особливості систем повітряного гамма-зондування на платформах БПЛА.

Для більш детального дослідження як спектральної роздільної здатності, так і інтенсивності гамма-випромінювання БПЛА потрібно зависати над окремими зонами радіаційного випромінювання [20]. Це не можливо з використанням БПЛА літакового типу. Тому більш перспективними є застосування БПЛА коптерного типу.

Під час повітряного зондування значних інтенсивностей гамма-випромінювання можуть застосовуватись детектори з чутливою речовиною меншого об'єму, а для малих інтенсивностей - меншого об'єму [20]. Взагалі, загальна швидкість рахунку $\dot{N}$ детектора визначається за аналітичною моделлю, яка має вигляд [21]

$$\dot{N} = A\varepsilon \frac{A_D}{4\pi h^2} \exp\left[-(\mu_a h + \mu_s d)\right], \quad (1)$$

де A – активність джерела, A_D – площа детектора, ε – пікова ефективність детектора за повною енергією, h - висота детектор над поземною поверхнею, d – глибина залягання джерела, μ_a, μ_s – лінійні коефіцієнти ослаблення для повітря та ґрунту, відповідно. Отже, зміною площі A_D детектора, наприклад, застуванням діафрагми змінного діаметра, можна регулювати швидкість підрахунку імпульсів, спричинених дією гамма-кантів. Це еквівалентно зміні об'єму чутливої речовини детектора.

Для виконання повітряного гамма-зондування використовуються в основному неколімовані детектори рухливого типу. У таких детекторів поле зору трактується у вигляді кругової області на земній поверхні під літальним апаратом, яка випромінює 90 відсотків від загального виявленого випромінювання [21]. Згідно з даних, наведених у роботі [22], для чутливої речовини детектора у формі кулі чи куба, висоти h = 20 м, енергій гамма-випромінювання від 1,5 до 3,0 МеВ, зміни густини повітря від 0,005 м^2/кг до 0,001 м^2/кг - діаметр поля зору детектора на земній поверхні змінюється з 180 м до 280 м, відповідно. Оскільки названі детектори є позиційно не чутливі, то це веде до спотворення просторової варіації концентрації нуклідів на земній поверхні в межах значного діаметра поля зору детектора [13]. Зі зменшенням висоти БПЛА коло дослідження буде зменшуватись і зменшуватиметься невизначеність у реєстрації просторової варіації концентрації нуклідів.

Математичні моделі, які застосовуються для визначення висотної поправки, містять експоненціальний інтеграл. Він не враховує збільшення кількості розсіяних фотонів, які потрапляють у континуум Комптона. Це зменшує інтенсивність

зареєстрованого гамма-випромінювання в порівняння з фактичною для приведення зареєстрованих на борту БПЛА значень інтенсивності наземного гамма-випромінювання до земної поверхні [13].

Ослаблення гамма-випромінювання як функція висоти суттєво впливає на інтенсивність вимірювання. Так, на висоті 40 м інтенсивності гамма-випромінювання зменшується на 50 % [13]. З іншого боку, у випадку значної інтенсивності гамма-випромінювання за низьких висот може виникнути спотворення результатів замірів через ненадійне функціонування електронної апаратури на борту БПЛА в умовах підвищеної радіації.

Отже, у підсумку: зменшення висоти для вимірювання радіаційного фону вимагає низьких висот розташування детектора радіації над об'єктом зондування, а для убезпечення електронного обладнання БПЛА – вищих висот розташування платформи БПЛА.

Досвід застосування картографічної основи вказує на те, що сервіс Google Earth, або ArcGIS Pro не гарантують актуальність відображення елементів та особливостей рельєфу місцевості для району виконання гамма-моніторингу на момент його проведення. Необхідне використання актуальної картографічної основи. Крім того, виникає потреба у відображенні на картографічному матеріалі долин, ярів, балок. У таких місцях радіаційні осади можуть накопичуватись. Температура повітря у зниженнях рельєфу може бути меншою від температури рівнини чи підвищень. Рослинний покрив і нерівності ґрунту (особливо під косими кутами) вносять додаткове ослаблення гамма-випромінювання [23]. Отже, пониження рельєфу вимагають додаткової уваги з погляду відображення їхньої топографії на картографічних матеріалах. Приведення результатів вимірювань до однакових, стандартних значень параметрів атмосфери потребують вимірювання температури повітря у зниженнях рельєфу.

Для координатного забезпечення повітряного гамма-моніторингу тепер використовуються мережі перманентних GNSS-станцій. Причому використовуються найближчі до району виконання повітряного гамма-моніторингу GNSS-станції. Однак, якщо БПЛА виконують польоти в крутих і вузьких долинах, то зв'язок з базовою GNSS-станцією може бути не настільки надійним, як це зазвичай буває на рівнинній місцевості. Це може ускладнити виконання GPS-позиціонування [13]. Тож виникає потреба в застосуванні GPS-базової станції.

Під час збору гамма-квантів з певною частотою відбувається інтегрування їх кількості за період вимірювання, наприклад 2 с, та усереднення значення. Середнє значення зібраних гамма-квантів, як кількість відліків за секунду та координати присвоюються середині періоду збору [24]. Позиційно точка середини збору за її координатними буде завжди знаходитись на осі маршруту БПЛА, хоча, максимум наземного випромінювання може знаходитись в межі поля зору детектора поза віссю маршруту за період збору. Тому якою б не досконалою була математична основа програми інтерполяції результатів гамма-зондування, кінцеві результати певною мірою наближено відображають варіації концентрації нуклідів на земній поверхні. Тому покращання точності позиціонування та інтенсивності відображення гамма-зондування вимагають уточнення варіації місцеположення максимумів гамма-випромінювання та меж радіаційних плям.

Результати гамма-зондування для картографування радіаційних осадів призначені для прийняття різних управлінських рішень. Це і евакуація людей по найбільш безпечних маршрутах, проведення дезактивації території. Тут до справи повинні долучатися дозиметристи. Користуючись координатною основою повітряного гамма-знімання, його візуалізацією та з використанням GPS-трекерів можна було б прокладати маршрути на місцевості. Однак через підвищений радіаційний фон робота електронної

апаратури може бути ускладнена, а розгортання пунктів дозиметричних вимірювань та прокладання наземних маршрутів потребує затрат часу та додаткового опромінення особового складу дозиметристів. Більш продуктивним було б проводити маркування на деякій віддаленості від наземного радіаційного поля – з борту БПЛА.

Для транспортного засобу з обладнанням системи повітряного моніторингу потрібен прохідний доступ до майданчика розгортання системи. З одного боку, такий майданчик повинен бути поблизу району гамма-зондування – для забезпечення мінімального часу на підліт БПЛА, а з іншого боку, він повинен розташовуватись поза зоною підвищеного радіаційного фону.

Мета статті. Головною метою цієї статті є вдосконалення системи картографування територій радіаційного забруднення на платформі БПЛА.

Виклад основного матеріалу. Головна ідея вдосконалення системи картографування територій радіаційного забруднення на платформі БПЛА [25] полягає у підвищенні достовірності відображення результатів гамма-зондування. Це досягається створенням актуальної картографічної основи, наближення результатів повітряного гамма-зондування до наземних вимірювань, а також маркування з борту БПЛА зон підвищеного радіаційного фону чи маршрутів більш безпечного пересування по території радіаційного забруднення. До складу системи входить повітряна платформа БПЛА коптерного типу й наземна станція керування, розміщена на транспортному засобі. Склад модульного обладнання СКТРЗ на платформі БПЛА наведено на рис. 1.

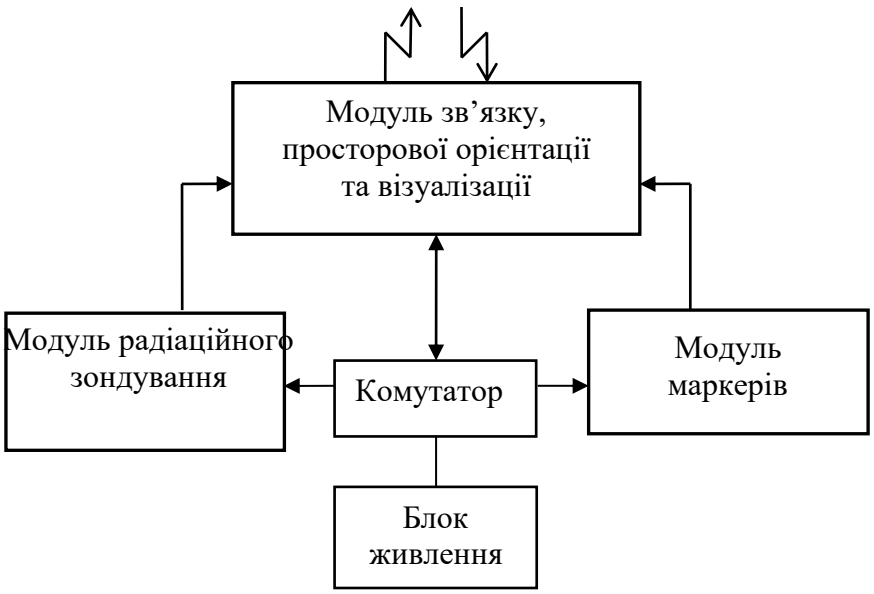


Рис. 1. Склад модульного обладнання СКТРЗ на платформі БПЛА:
- модуль зв'язку, просторової орієнтації та візуалізації, який містить:
блок передачі та прийому даних; блок керування польотом; GPS-приймач;
знімальну камеру на кардановому підвісі; лазерний висотомір; камеру огляду;
багатоканальний аналогово-цифровий перетворювач (АЦП);
- модуль радіаційного зондування, який містить: механізм регулювання діафрагми
детектора; детектор гамма-випромінювання; термопару; кабель;
механізм звільнення кабелю; механізм спуску-підйому детектора;
лічильник довжини кабелю; двоканальний підсилювач;
- модуль маркерів, який містить: маркери у вигляді стріли та кульки
Джерело: розроблено авторами.

Детектор гамма-випромінювання разом із механізмом регулювання діаметру діафрагми і термопарою механічно зв'язаний за допомогою кабелю з механізмом звільнення від кабелю, механізмом спуску-підйому детектора та лічильником довжини кабелю. Застосування наведених механізмів дозволяє регулювати розмір вхідної діафрагми детектора гамма-випромінювання, опускати його разом з термопарою на відому висоту відносно земної поверхні, а також відчіплювати механізм регулювання діаметру діафрагми, детектор гамма-випромінювання, термопару разом з кабелем – у разі утримання цих пристроїв місцевими предметами. Блок керування польотом містить систему керування гвинтами, інерційний вимірювальний блок, компас. Для наземного маркування на борту БПЛА розміщується модуль маркерів. Він може бути встановлений замість модуля радіаційного зондування.

Маркери мають вигляд (рис. 2) стріли – для маркування на ґрунтовій поверхні та кулі – для застосування на твердому покритті. Кулі мають еластичні елементи на зовнішній поверхні, що нагадують зовні оболонку каштана. Ці елементи зменшать силу удару об тверде покриття та гальмуватимуть обертовий рух маркеру, що забезпечить незначне відхилення маркеру від точки скидання.

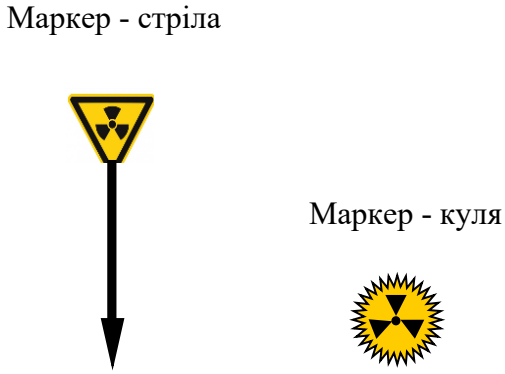


Рис. 2. Зовнішній вигляд маркерів [25]

Блок-схему обладнання СКТРЗ на наземному транспортному засобі наведено на рис. 3. Метеорологічне обладнання транспортного засобу містить барометр і термометр. Бокс з джерелом гамма-випромінювання має колімоване джерелом гамма-випромінювання відомої потужності та складу. Модуль маркерів містить комплекти маркерів у вигляді стріли чи кулі. До комплекту детекторів входять запасні детектори гамма-випромінювання з механізмами регулювання діаметра діафрагми, термопарами та електричними кабелями від них.

Гамма-картографування виконується в кілька етапів. Завдання першого етапу полягає у створені актуальної картографічної основи та виконання розвідки території радіаційного забруднення. Кінцевим результатом першого етапу є ортофотоплан території радіаційного забруднення з зафіксованими на ньому плямами радіаційних опадів. Це дає змогу оцінити масштаби розповсюдження та виконати попередню оцінку ступеня інтенсивності та локалізації гамма-випромінювання. На другому етапі виконується дорозвідка території з уточненням ступеня інтенсивності та місць локалізації гамма-випромінювання. Для цього виконується гамма-зондування з низьких висот з зависанням БПЛА. Результатом цього етапу є уточнення локалізації гамма-випромінювання на ортофотоплані. На третьому етапі виконується маркування з борту БПЛА меж районів із високим рівнем випромінювання, а також можливих маршрутів евакуації персоналу чи населення.

Конкретика реалізації першого етапу полягає в наступному. На територію гамма-зондування з використанням, наприклад сервісу Google Earth, готується план аерофотознімання. План аерофотознімання знаходиться в комп'ютері наземної станції керування. Екіпаж на транспортному засобі виїздить до району ймовірного радіаційного забруднення. До під'їзду в район забруднення вмикається блок живлення наземної станції керування. За командою з персонального комп'ютера включається в роботу автомобільний дозиметр, за показами якого вибирається ділянка місцевості з безпечним радіаційним фоном. Виконується розгортання GPS-базової станції, опрацювання результатів обсервації, передача інформації на персональний комп'ютер наземної станції керування через з'єднання Wi-Fi.

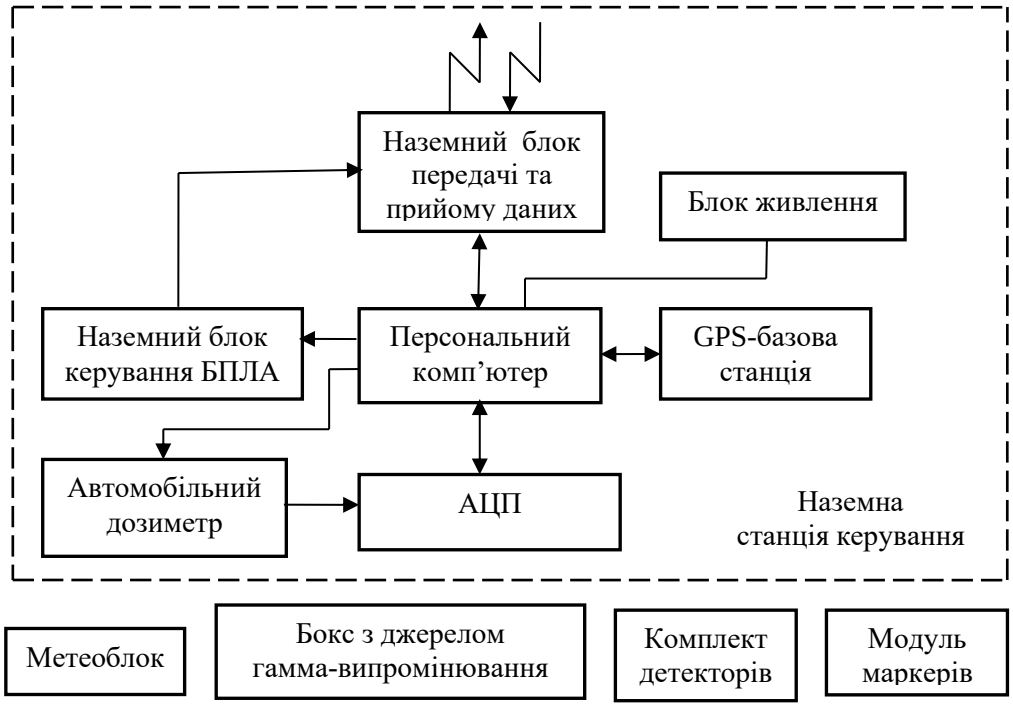


Рис. 3. Блок-схема обладнання СКТРЗ на наземному транспортному засобі [25]

Монтується до злету БПЛА та встановлюється на місцевості бокс із колімованим джерелом гамма-випромінювання та відкривається його верхня частина, що звільнює малопотужне джерело еталонного гамма-випромінювання для випромінювання догори. За командою з наземної станції керування по каналу радіозв'язку вмикається блок живлення БПЛА. Через комутатор виконується включення в роботу АЦП, блоку керування польотом, камери огляду, GPS-приймача, знімальної камери, механізм регулювання діафрагми детектора, детектора гамма-випромінювання, термопари, двоканального підсилювача сигналів від детектора й термопари, лазерного висотоміра. За командою з наземної станції спостереження БПЛА підіймається в повітря та розташовується над боксом з еталонним джерелом гамма-випромінювання на заданій висоті. При цьому досягається максимальний діаметр діафрагми детектора. За показами лічильника довжини кабелю детектор гамма-випромінювання разом з термопарою опускаються на 1 метр відносно боксу з джерелом еталонного гамма-випромінювання. Вимірюється потужність гамма-випромінювання еталонного джерела та температура повітря. Аналогові сигнали від детектора гамма-випромінювання, термопари підсилюються двоканальним підсилювачем та разом з аналоговими сигналами від знімальної камери, лазерного висотоміра та лічильника довжини кабелю надходять до

багатоканального АЦП. Цифрові сигнали передаються далі каналом зв'язку на наземну станцію та надходять до персонального комп'ютера. Далі, за командою з наземної станції керування, механізм регулювання діафрагми детектора, детектор гамма-випромінювання, термопара підіймається до борту БПЛА, а сам БПЛА переміщується на вищу задану висоту. Виконуються вимірювання інтенсивності еталонного джерела гамма-випромінювання і температури повітря. Покази цих давачів надходять каналом зв'язку до персонального комп'ютера наземної станції спостереження. За результатами вимірювань інтенсивності гамма-випромінювання на двох висотах визначається висотна поправка за технологією, описаною, наприклад, у роботі [18]. Визначається також тиск атмосферного повітря за допомогою метеообладнання, що знаходиться у метеоблоці. Інформація каналами зв'язку передається у закодованому вигляді – для убезпечення інформації від несанкціонованого доступу.

Далі виконується політ БПЛА з точки старту до території радіаційного зондування. За встановленою програмою реалізації місії виконується керування польотом БПЛА через наземний блок керування БПЛА. Сигнали керування передаються каналами зв'язку до БПЛА, надходять через комутатор до блоку керування польотом, GPS-приймача та камери огляду. Камера огляду дозволяє вести спостереження за об'єктами в напрямку польоту. Оперативна інформація стосовно режиму роботи двигунів, системи інерційного вимірювального блоку, компасу, GPS-приймача та відеоінформація надходять каналами зв'язку до персонального комп'ютера наземної станції керування.

Аерознімання території радіаційного забруднення виконується галсами. Періодично та синхронно виконуються зчитування сигналів з детектора гамма-випромінювання, термопари, GPS-приймача та лазерного висотоміра. Також виконується фотографування території знімальною камерою. Інформація від вказаних давачів та відеоінформація передається каналами зв'язку на персональний комп'ютер наземної станції спостереження та фіксується в його пам'яті. Після опрацювання результатів аерознімання та гамма-зондування за допомогою програмних засобів будується цифрова модель місцевості, актуальний оглядовий ортофотоплан. Якщо територія незабудована, то ортофотоплан будується в масштабі 1:5000. Якщо ж територія аерознімання забудована, то ортофотоплан виконується в масштабі 1:2000. Це дає змогу краще ідентифікувати окремі будинки та споруди і елементи місцевості. Крім того, якщо місцевість заліснена, або горбиста чи покрита ярами, балками, то до аерофотознімання долучається LiDAR. Він встановлюється на місце блоку лазерного висотоміра перед виконанням місії. Застосування LiDAR особливо ефективне в зниженнях рельєфу, вкритих, як правило, кущами, рослинністю та в залісненій місцевості. Проникаючі лазерні промені здатні відслідкувати відмітки землі. На ортофотоплані фіксується розподіл потужності дози гамма-випромінювання на земній поверхні, а при необхідності визначається попередній спектральний склад гамма-випромінювання.

Далі реалізується план другого етапу гамма-знімання. На борту БПЛА повинен знаходитись лазерний висотомір. Для отримання більш об'єктивної інформації про радіаційний фон, температуру повітря над долинами, ярами чи балками, дахами жилих будинків виконується гамма-зондування з низьких висот (бажано 1 м над земною поверхнею). Для цього БПЛА зависає над цими об'єктами місцевості. За командою з персонального комп'ютера вмикається механізм спуску-підйому детектора. Відбувається спуск механізму регулювання діаметра діафрагми, детектора гамма-випромінювання і термопари з кабелем, довжина якого визначається лічильником довжини кабелю. Висота БПЛА відносно земної поверхні визначається лазерним висотоміром. За різницею показів лазерного висотоміра та лічильника довжини кабелю визначається висота детектора гамма-випромінювання і термопари над земною поверхнею, а координати

БПЛА визначаються за показами GPS-приймача. Візуальні спостереження ведуться з використанням камери огляду та знімальної камери. Відеоінформація і дані від давачів передаються каналами зв'язку до персонального комп'ютера. Уточнюється спектральний склад гамма-випромінювання.

Висоти, що використовуються для приведення вимірювання гамма-поля з висоти обсервації h_{obs} до земної поверхні, перетворюються в ефективні висоти для стандартного значення температури 0°С і тиску повітря 101,325 кПа за формулою [26].

$$h_{STR} = \frac{273{,}15 \cdot P}{101{,}325(T + 273{,}15)} h_{obs}, \quad (2)$$

де h_{obs} – виміряна висота над рівнем землі (метри), T - температура повітря (С), P – тиск повітря (кПа). Значення температури в точках обсервації визначаються за допомогою термопари, тиск - за показами барометра на наземній станції керування. Вимірювання температури з використанням термопари з низьких висот відносно земної поверхні та у зниженнях рельєфу і приведення значення інтенсивностей випромінювання наземного радіаційного поля до одного стандартного значення температури і тиску дозволяє в підсумку точніше охарактеризувати його розподіл.

У разі зачіпання кабелю чи детектора гамма-випромінювання і термопари разом з механізмом регулювання діафрагми детектора місцевими предметами, що не дозволяє виконати підйом цих пристроїв на борт БПЛА, відбувається звільнення кабелю разом з названими пристроями від БПЛА за командою з персонального комп'ютера. Ця подія фіксується за допомогою знімальної камери. БПЛА перериває місію та повертається до наземної станції керування. Тут з комплекту детекторів добуваються механізм регулювання діафрагми детектора, детектор гамма-випромінювання, термопара, які приєднані до кабелю, а сам кабель підключається до роз'ємну, що знаходиться в механізмі звільнення кабелю. БПЛА повертається на місце перерваної місії та продовжує її.

Вимірювання інтенсивності гамма-випромінювання зі спуском детектора на низьку висоту виконуються і для уточнення місць локалізації плям та максимумів радіаційного випромінювання на основі даних, отриманих на першому етапі гамма-зондування.

У випадку інтенсивного гамма-випромінювання території розвідки, заміри детектором гамма-випромінювання виконуються з максимальною довжиною кабелю – для захисту електронної апаратури БПЛА від радіаційних завад та зі зменшеним діаметром вхідної діафрагми детектора – для запобігання надзвичайно великої швидкості підрахунку гамма-квантів. Після виконання місії та прибуття БПЛА до району розташування транспортного засобу, виконується калібрування детектора гамма-випромінювання відносно еталонного джерела гамма-випромінювання та введенням поправок у заміри радіаційного фону, виконаного в місцях зі зменшеним діаметром вхідної діафрагми детектора.

На уточненому ортофотоплані локалізації радіаційного поля відбувається прокладка маршрутів евакуації персоналу чи населення, меж районів із високим рівнем випромінювання. Намічають та визначають координати місць скидів маркерів.

На третьому етапі з борту БПЛА виконується маркування на місцевості меж районів з високим рівнем випромінювання, а також можливих маршрутів евакуації персоналу чи населення. З цією метою модуль радіаційного зондування демонтується з платформи БПЛА, а на його місце встановлюється модуль маркерів, отриманий із транспортного засобу. Така заміна дозволяє збалансувати корисне навантаження та зменшити габаритно-вагові характеристики платформи БПЛА. БПЛП виконує політ до намічених точок скидів маркерів. Над наміченими на ортофотоплані точками БПЛА зависає. Якщо під БПЛА знаходиться ґрунтовий покрив, то виконуються скиди маркерів у вигляді стріли, якщо ж тверде покриття, то маркерів у вигляді кульки.

Звісно, таке навантаження як механізм регулювання діафрагми детектора, механізм спуску-підйому детектора, механізм звільнення від кабелю, лічильник довжини кабелю, сам кабель у підсумку мають значну вагу. Проте, на сьогодні спостерігається швидке покращення технічних характеристик БПЛА. Наприклад, під час ведення бойових дій в Україні використовується важкий гексакоптер «Vampire», який дістав назву «Баба Яга» – за використання в темний час доби та гуркіт від роботи потужних двигунів. Вантажність цього БПЛА зазвичай становить 10...15 кілограмів, хоча деякі модифікації здатні нести до 20 кг і навіть до 25 кг. Розробляються модифікації цього БПЛА, які здатні нести до 150 кг [27].

Висновки. Розроблено нову систему картографування території радіаційного забруднення на платформі БПЛА. Система спрямована на:

- підвищення точності та достовірності результатів гамма-картографування виконанням гамма-зондування з низьких висот відносно земної поверхні та в перетнутій місцевості за наявності механізму спуску-підйому детектора гамма-випромінювання і термопари з борту БПЛА, що наближає результати гамма-зондування до наземних вимірювань;
- застосування модульного компонування, яке дозволяє виконувати заміну модулів на платформі БПЛА залежно від завдань гамма-картографування, що дозволяє зменшити габаритно-вагові характеристики БПЛА;
- створення актуальної картографічної основи у вигляді ортофотоплану в масштабі 1:5000 – для незабудованої території та в масштабі 1:2000 – для забудованої території шляхом аерофотознімання території радіаційного моніторингу під час гамма-зондування;
- зменшення ризику додаткового опромінення особового складу дозиметристів шляхом маркування маршрутів виходу населення та персоналу підприємств з зони підвищеного радіаційного фону та маркування меж цієї зони з борту БПЛА;
- зменшення ймовірності потрапляння екіпажу транспортного засобу в зону підвищеного радіаційного випромінювання за наявності автомобільного дозиметра.

Подальші перспективи досліджень полягають у розробці пропозицій з використання колімованих детекторів гамма-зондування для покращання роздільної здатності гамма-картографування.

Список використаних джерел

1. Burachek, V., Malik, T., Kryachok, S., Bryk, Y., & Belenok, V. (2018). Device for automated leveling. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*, *5(431)*, 95-99. https://doi.org/10.32014/2018.2518-170X.13.

2. *Наземний дрон для сільського господарства XAG R150.* (2022). https://store.drone.ua/nazemnyi-dron-xag-r150-2022-xauv-revomower/.

3. Martello, M., Silva, M.L., Silva, C.A.A.C., Rizzo, R., Oliveira, A.K.d.S., & Fiorio, P.R. (2025). Unmanned Aerial Vehicles and Low-Cost Sensors for Monitoring Biophysical Parameters of Sugarcane. *AgriEngineering*, *7 (12)*, 1-18. https://doi.org/10.3390/agriengineering7120403

4. *Наземні дрони на війні: як роботи змінюють логістику, рятують життя і переносять фронт у XXI столітті*. (2025). https://robots.com.ua/nazemni-droni-na-vijni-dosvid-ukraini-u-2022%E2%80%932025/.

5. Kalamkar, R. B., Ahire, M. C., Ghadge, P. A., Dhenge, S. A., & Anarase, M. S. (2020). Drone and its Applications in Agriculture. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 9*(6), 3022-3026. doi: https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.906.363.

6. An, D. H., Kang, Y. S., Park, C. H., Je, G. I., & Ryu, C. S. (2025). Development of Prediction Models for Apple Fruit Diameter and Length Using Unmanned Aerial Vehicle-Based Multispectral Imagery. *AgriEngineering*, *7 (361)*, 1-16. https://doi.org/10.3390/agriengineering7110361.

7. *Стале відновлення України: внесок БпЛА у цифрову трансформацію лісового господарства.* (2023). https://culver.aero/uk/news/stalie-vidnovliennia-ukrayini-vniesok-bp-la-u-tsifrovu-transformatsiiu-lisovogho-ghospodarstva.

8. Ji, Peng, Cheng, Lan, Jia, Yong, & Du, Wenjia. Application of UAV Photogrammetry Technology in Airport Project. (2020). *6th International Conference on Energy Science and Chemical Engineering, 565*, 1-6). Bristol. https://doi.org/10.1088/1755-1315/565/1/012029.

9. Zatserkovnyi, V.I., Kryachok, S.D., Mamontova, L.S., Popkov, B., & Chepkov, I. Analysis of the accuracy of the orthophoto map building according to aerial photography results executed with UAV. (2020). *XIXth International Conference "Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*. https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57204332476.

10. Widodo, S., Abimanyu, A., & Apribra R. (2020). Development of drone mounted aerial gamma monitoring system for environmental radionuclide surveillance in BATAN. *Journal of Physics Conference Series, 1436*, *1-7*. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1436/1/012126.

11. Gordon, G. (2008). *Practical Gamma-ray Spectrometry.* https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470861981.

12. Grasty, R. L., Richardson, K. A., & Knight, G. B. (1977). Airborne detection of small radioactive sources. *Aerial Techniques for Environmental Monitoring* (pp. 182-192). Las Vegas.

13 Kunze, C., B. Preugschat, R. Arndt, F. Kandzia, B. Wiens, & S. Altfelder. (2022). Development of a UAV-Based Gamma Spectrometry System for Natural Radionuclides and Field Tests at Central Asian Uranium Legacy Sites. *Remote Sensing, 14 (9)*, 1-28. https://doi.org/10.3390/rs14092147.

14. Chierici, A., Malizia, A., Di Giovanni, D., Ciolini, R., & d'Errico, F. (2022). High-Performance Gamma Spectrometer for Unmanned Systems Based on Off-the-Shelf Components. *Sensors,* 3(22*),* 1-18. https:// doi.org/10.3390/s22031078.

15. Sato Yuki, Ozawa Shingo, Terasaka Yuta, Kaburagi Masaaki, Tanifuji Yuta, Kawabata Kuniaki, Nakamura Miyamura Hiroko, Izumi Ryo, Suzuki Toshikazu, & Torii Tatsuo. (2018). Remote radiation imaging system using a compact gamma-ray imager mounted on a multicopter drone. *Journal of Nuclear Science and Technology*, *55*(1), 90-96. https://doi.org/10.1080/00223131.2017.1383211.

16. Burtniak V., Zabulonov Yu., Stokolos Ma., Bulavin Le., & Krasnoholovet V. (2018). Application of a territorial remote radiation monitoring system at the Chornobyl nuclear accident site. *Remote Sens*, *12*(4), 1-13. https://doi.org/10.1117/1.JRS.12.046007.

17. Tereshchuk, O., Kryachok, S., Belenok, V., Boyko, O., & Alpert, S. (2023). Improvement of the method of verification of the drift of the gyrovertical on the UAV during aerial photography using the liquid horizon. *Journal of Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *32*, 101045. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101045.

18. Min Xiao, Jing Liang, Li Ji, Zheng Sun, & ZeYu Li. (2022). Aerial photography trajectory-tracking controller design for quadrotor UAV. *Measurement and Control 55(7-8),* 738–745. https://doi.org/10.1177/00202940221115634.

19. Sergiy Kryachok, Vadym Belenok, Dmytro Liashenko, Liliia Hebryn-Baidy, Roman Tretiak, & Olena Boyko. (2025). Peculiarities of using visualisation systems on UAVs platforms for remote gamma monitoring. *Geodetski list, 2*, 95–118. https://hrcak.srce.hr/clanak/483606.

20. Kunze, C., Preugschat, B., Arndt, R., Kandzia, F., Wiens, B., & Altfelder, S. (2022). Development of a AV-Based Gamma Spectrometry System for Natural Radionuclides and Field Tests at Central Asian Uranium Legacy Sites. *Remote Sens. 14(9),* 1-28. https://doi.org/10.3390/rs14092147.

21. Cresswell, A. J., & D. C. W. Sanderson. (2012). Evaluating Airborne and Ground Based Gamma Spectrometry Methods for Detecting Particulate Radioactivity in the Environment: A Case Study of Irish Sea Beaches. *Science of the Total Environment* 437, 285–296. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.064.

22. Duval, Joe S., Cook B., & Adams, A.S. John. (1971). CircleofInvestigation ofanAir-borneGamma-Ray Spectromer. *Journal of geophysical Research, 76*(35), 8466-8470.

23. Schwarz, G.F., Rybach, L., Barlocher, C.K., & Klingele, E.E. (1993). Development and Calibration of an Airborne Radiometric Measurin System. In Application of uranium exploration data and techniques in environmental studies. *Proceedings of the Technical Committee Meeting* (9–12). Vienna.

24. Gilmore, G. (2011). *Practical Gamma-Ray Spectroscopy* (2nd edition). Wiley: Chichester. http://download.e-bookshelf.de/download/0000/7238/17/L-G-0000723817-0002366164.pdf.

25. Крячок, С, Д., Терещук, О.І. (2025). *Система картографування території радіаційного забруднення* (Патент, України №129110). Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій. https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/simple/?form-TOTAL_FORMS=3&form-INITIAL_FORMS=1&form-MAX_NUM_FORMS=&form-0-param_type=3&form-0-value=129110&form-1-param_type=6&form-1-value=КРЯЧОК+СЕРГІЙ+ДМИТРОВИЧ&form-2-param_type=9&form-2-value=СИСТЕМА+КАРТОГРАФУВАННЯ+ТЕРИТОРІЇ+РАДІАЦІЙНОГО+ЗАБРУДНЕННЯ.

26. *Guidelines for Radioelement Mapping Using Gamma Ray Spectrometry Data. IAEA-TECDOC-1363*. (2003). International Atomic Energy Agency. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1363_web.pdf.

27. *Український дрон Баба Яга: що відомо, які переваги та технічні характеристики*. (2024). https://fakty.com.ua/ua/ukraine/20240131-ukrayinskyj-dron-baba-yaga-shho-vidomo-yaki-perevagy-ta-tehnichni-harakterystyky.

References

1. Burachek, V., Malik, T., Kryachok, S., Bryk, Y., Belenok, V. (2018). Device for automated leveling. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*, *5(431)*, 95-99. https://doi.org/10.32014/2018.2518-170X.13.

2. Nazemnyy dron dlya sil′s′koho hospodarstva XAG R150 [XAG R150 agricultural ground drone]. (2022). https://store.drone.ua/nazemnyi-dron-xag-r150-2022-xauv-revomower.

3. Martello, M., Silva, M.L., Silva, C.A.A.C., Rizzo, R., Oliveira, A.K.d.S., & Fiorio, P.R. (2025). Unmanned Aerial Vehicles and Low-Cost Sensors for Monitoring Biophysical Parameters of Sugarcane. *AgriEngineering*, *7 (12)*, 1-18. https://doi.org/10.3390/agriengineering7120403.

4. Nazemni drony na viyni: yak roboty zminyuyut′ lohistyku, ryatuyut′ zhyttya i perenosyat′ front u XXI stolittya [Ground-based drones in warfare: how robots are changing logistics, saving lives, and bringing the front into the 21st century]. (2025). https://robots.com.ua/nazemni-droni-na-vijni-dosvid-ukraini-u-2022%E2%80%932025.

5. Kalamkar, R. B., Ahire, M. C., Ghadge, P. A., Dhenge, S. A., Anarase, M. S. (2020). Drone and its Applications in Agriculture. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences,* 9 (6), 3022-3026. doi: https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.906.363.

6. An, D.H., Kang, Y.S., Park, C.H., Je, G.I., Ryu, C.S. (2025). Development of Prediction Models for Apple Fruit Diameter and Length Using Unmanned Aerial Vehicle-Based Multispectral Imagery. *AgriEngineering*, 7*(361),* 1-16. https://doi.org/10.3390/agriengineering7110361.

7. Stale vidnovlennya Ukrayiny: vnesok BpLA u tsyfrovu transformatsiyu lisovoho hospodarstva. [Sustainable recovery of Ukraine: the contribution of UAVs to the digital transformation of forestry]. (2023). https://culver.aero/uk/news/stalie-vidnovliennia-ukrayini-vniesok-bp-la-u-tsifrovu-transformatsiiu-lisovogho-ghospodarstva.

8. Ji, Peng, Cheng, Lan, Jia, Yong, Du, Wenjia. Application of UAV Photogrammetry Technology in Airport Project. (2020). *6th International Conference on Energy Science and Chemical Engineering,* 565, 1-6). Bristol. https://doi.org/10.1088/1755-1315/565/1/012029.

9. Zatserkovnyi, V.I., Kryachok, S.D., Mamontova, L.S., Popkov, B., Chepkov, I. Analysis of the accuracy of the orthophoto map building according to aerial photography results executed with UAV. (2020). *XIXth International Conference "Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*. https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57204332476.

10. Widodo, S., Abimanyu, A., Apribra R. (2020). Development of drone mounted aerial gamma monitoring system for environmental radionuclide surveillance in BATAN. *Journal of Physics Conference Series, 1436*, *1-7*. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1436/1/012126.

11. Gordon, G. (2008). Practical Gamma-ray Spectrometry. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470861981.

12. Grasty, R. L., Richardson, K. A., & Knight, G. B. (1977). Airborne detection of small radioactive sources. *Aerial Techniques for Environmental Monitoring* (pp. 182-192). Las Vegas.

13 Kunze, C., B. Preugschat, R. Arndt, F. Kandzia, B. Wiens, Altfelder, S. (2022). Development of a UAV-Based Gamma Spectrometry System for Natural Radionuclides and Field Tests at Central Asian Uranium Legacy Sites. *Remote Sensing, 14 (9)*, 1-28. https://doi.org/10.3390/rs14092147.

14. Chierici, A., Malizia, A., Di Giovanni, D., Ciolini, R., d'Errico, F. (2022). High-Performance Gamma Spectrometer for Unmanned Systems Based on Off-the-Shelf Components. *Sensors,* 3(22*),* 1-18. https:// doi.org/10.3390/s22031078.

15. Sato Yuki, Ozawa Shingo, Terasaka Yuta, Kaburagi Masaaki, Tanifuji Yuta, Kawabata Kuniaki, Nakamura Miyamura Hiroko, Izumi Ryo, Suzuki Toshikazu, & Torii Tatsuo. (2018). Remote radiation imaging system using a compact gamma-ray imager mounted on a multicopter drone. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 55(1), 90-96. https://doi.org/10.1080/00223131.2017.1383211.

16. Burtniak V., Zabulonov Yu., Stokolos Ma., Bulavin Le., Krasnoholovet V. (2018). Application of a territorial remote radiation monitoring system at the Chornobyl nuclear accident site. *Remote Sens*, 12(4). 1-13. https://doi.org/10.1117/1.JRS.12.046007.

17. Tereshchuk, O., Kryachok, S., Belenok, V., Boyko, O., Alpert, S. (2023). Improvement of the method of verification of the drift of the gyrovertical on the UAV during aerial photography using the liquid horizon. *Journal of Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 32, 101045. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101045.

18. Min Xiao, Jing Liang, Li Ji, Zheng Sun, ZeYu Li. (2022). Aerial photography trajectory-tracking controller design for quadrotor UAV. *Measurement and Control 55(7-8),* 738–745. https://doi.org/10.1177/00202940221115634.

19. Sergiy Kryachok, Vadym Belenok, Dmytro Liashenko, Liliia Hebryn-Baidy, Roman Tretiak, Olena Boyko. (2025). Peculiarities of using visualisation systems on UAVs platforms for remote gamma monitoring. *Geodetski list, 2*, 95–118. https://hrcak.srce.hr/clanak/483606.

20. Kunze, C., Preugschat, B., Arndt, R., Kandzia, F., Wiens, B., Altfelder, S. (2022). Development of a AV-Based Gamma Spectrometry System for Natural Radionuclides and Field Tests at Central Asian Uranium Legacy Sites. *Remote Sens. 14(9),* 1-28. https://doi.org/10.3390/rs14092147.

21. Cresswell, A. J., D. C. W. Sanderson. (2012). Evaluating Airborne and Ground Based Gamma Spectrometry Methods for Detecting Particulate Radioactivity in the Environment: A Case Study of Irish Sea Beaches. *Science of the Total Environment* 437, 285–296. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.064.

22. Duval, Joe S., Cook B., Adams, A.S. John. (1971). CircleofInvestigation ofanAir-borneGamma-Ray Spectromer. *Journal of geophysical Research, 76, (35).* 8466-8470.

23. Schwarz, G.F., Rybach, L., Barlocher, C.K., Klingele, E.E. (1993). Development and Calibration of an Airborne Radiometric Measurin System. In Application of uranium exploration data and techniques in environmental studies. *Proceedings of the Technical Committee Meeting* (pp. 9–12). Vienna.

24. Gilmore, G. (2011). Practical Gamma-Ray Spectroscopy (2nd ed). Preprints: Wiley, Chichester. Wiley: Chichester. http://download.e-bookshelf.de/download/0000/7238/17/L-G-0000723817-0002366164.pdf.

25. Kryachok, S. D., Tereshchuk, O. I. (2025). Systema kartohrafuvannya terytoriyi radiatsiynoho zabrudnennya [System for mapping the territory of radiation contamination]. (Ukrainian patent, №129110). https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/simple/?form-TOTAL_FORMS=3&form-INITIAL_FORMS=1&form-MAX_NUM_FORMS=&form-0-param_type=3&form-0-value=129110&form-1-param_type=6&form-1-value=КРЯЧОК+СЕРГІЙ+ДМИТРОВИЧ&form-2-param_type=9&form-2-value=СИСТЕМА+КАРТОГРАФУВАННЯ+ТЕРИТОРІЇ+РАДІАЦІЙНОГО+ЗАБРУДНЕННЯ.

26. *Guidelines for Radioelement Mapping Using Gamma Ray Spectrometry Data. IAEA-TECDOC-1363*. (2003). Vienna: International Atomic Energy Agency. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1363_web.pdf.

27. Ukrayins′kyy dron Baba Yaha: shcho vidomo, yaki perevahy ta tekhnichni kharakterystyky [Ukrainian drone Baba Yaga: what is known, what are the advantages and technical characteristics]. (2024). https://fakty.com.ua/ua/ukraine/20240131-ukrayinskyj-dron-baba-yaga-shho-vidomo-yaki-perevagy-ta-tehnichni-harakterystyky.

Дата першого надходження статті до видання: 20.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.01.2026

UDC 528.83

Sergiy Kryachok[1], Oleksiy Tereshchuk[2]

[1]PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: geodesist2015@gmail.com. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0001-5633-1501
ResearcherID: N-3061-2016. **SCOPUS Author ID:** 57204332476

[2]PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: olexter1957@gmail.com. **ORCID**: http://orcid.org/0000-0001-6433-9351
ResearcherID: http://www.researcherid.com/rid/H-4540-2016. **SCOPUS Author ID:** 57211315791
GoogleScholar: https://scholar.google.com/citations?view_op=list_works&hl=ru&user=vZtF4YIAAAAJ
https://scholar.google.com.ua/citations?user=vZtF4YIAAAAJ&hl=uk&citsig=AMstHGRJW5NzJv81Vio_Xp9rgjtO_Wm2GA
IndexCopernicus: http://journals.indexcopernicus.com/+++,p24781806,3.ht

SYSTEM FOR MAPPING AREAS OF RADIATION CONTAMINATION ON A UAV PLATFORM

The article addresses the problem of improving radiation-contaminated area mapping using unmanned aerial vehicles (UAVs) as an element of environmental radiation monitoring. The relevance of the research is driven by the growing risks associated with nuclear accidents, damage to nuclear facilities, and the potential release of radioactive materials, which may result in large-scale radioactive contamination. Under such conditions, rapid, accurate, and safe acquisition of spatially referenced radiation data is crucial for decision-making, emergency response, evacuation planning, and mitigation measures.

The study proposes an advanced UAV-based gamma-survey system focused on increasing the reliability and spatial resolution of radiation mapping results. Unlike traditional airborne gamma monitoring using manned aircraft, the proposed approach relies on a multirotor UAV platform capable of low-altitude flights and stationary hovering. This significantly enhances measurement resolution due to reduced flight altitude and speed, while also lowering operational costs and risks to personnel.

A key feature of the proposed system is its modular architecture, which allows flexible replacement of functional units depending on mission objectives. The UAV payload includes a radiation sensing module with a gamma detector equipped with an adjustable aperture and a mechanism for lowering and raising the detector on a cable. This solution makes it possible to perform measurements at very low heights above the ground, bringing airborne gamma-survey data closer to ground-based measurements. Temperature and pressure sensors are integrated into the system to ensure accurate correction of radiation intensity values to standard atmospheric conditions.

Another important component of the system is the creation of an up-to-date cartographic basis using aerial photogrammetry. During gamma surveying, high-resolution aerial images are collected to generate an orthophoto map of the study area at scales of 1:5000 for undeveloped territories and 1:2000 for built-up areas. In complex terrain, such as forested or highly dissected landscapes, LiDAR data acquisition can be additionally employed to improve terrain representation. This approach ensures that radiation data are visualized on an акmyal and detailed spatial background, accounting for terrain depressions where radioactive fallout may accumulate.

The gamma-survey process is organized in several stages. The first stage includes reconnaissance and generation of an orthophoto map combined with preliminary identification of radiation anomalies. The second stage involves detailed investigation of selected areas using low-altitude hovering and lowered detector measurements to refine the localization and intensity of gamma radiation. The third stage provides physical marking of high-radiation zones and safer evacuation routes directly from the UAV by deploying specially designed ground markers. This solution reduces the need for personnel to enter hazardous areas and minimizes additional radiation exposure.

The proposed system also integrates precise positioning support through the use of a local GNSS base station, improving coordinate accuracy in areas with limited satellite signal reliability, such as narrow valleys or rugged terrain. Overall, the developed methodology increases the accuracy, operational efficiency, and safety of radiation-contaminated area mapping and demonstrates the potential of UAV-based gamma monitoring as an effective tool for emergency response and environmental protection.

Keywords: *unmanned aerial vehicle (UAV); gamma radiation survey; radiation contamination mapping; environmental radiation monitoring; orthophoto map; low-altitude measurements; modular sensing system.*

Fig.: 3. References: 27.

Крячок С. Д., Терещук О. І. Система картографування території радіаційного забруднення на платформі БПЛА. *Технічні науки та технології,* 2026. № 1(43). С. 415-429. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-415-429.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-430-446
УДК 528.9:911.3

Ірина Романівна Стахів[1], Віктор Васильович Ворох[2], Владислав Олександрович Деркач[3], Сергій Віталійович Чепіль[4]

[1]кандидат геологічних наук, асистент кафедри геоінформатики
Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)
E-mail: stakhivira@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0007-3090-6988

[2] аспірант кафедри геоінформатики
Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)
E-mail: fainkucha@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0005-0112-8422

[3] студент бакалаврату, кафедра геоінформатики
Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)
E-mail: vladdd120904@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0002-7803-2224

[4] студент магістратури, кафедра геоінформатики
Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)
E-mail: chepil.sergey@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0007-9296-1106

ТЕХНОЛОГІЇ ГІС ТА ДЗЗ В ЕФЕКТИВНОМУ ВИКОРИСТАННІ ЗЕМЕЛЬНИХ РЕСУРСІВ

У дослідженні розглянуто можливості застосування геоінформаційних систем (ГІС) і даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) для моніторингу стану та ефективності використання земельних ресурсів. Дослідження виконано на прикладі території Каховського водосховища, що зазнала суттєвих трансформацій унаслідок порушення гідрологічного режиму. На основі супутникових знімків Sentinel-2 та індексу NDWI проаналізовано просторово-часову динаміку водної поверхні упродовж червня – серпня 2023 року, що дозволило кількісно оцінити масштаби скорочення водної поверхні та трансформації земель.

З використанням платформ Copernicus Browser і Google Earth Engine здійснено картографування змін та просторову інтерпретацію площ водної акваторії. Отримані результати свідчать про скорочення площі відкритої водної поверхні більш ніж на 85 % упродовж червня 2023 року, що є індикатором масштабної трансформації землекористування та втрати водорегулювальної функції Каховського водосховища.

Ключові слова: *землекористування; геоінформаційні системи (ГІС); дистанційне зондування Землі (ДЗЗ); нормалізований диференційний водний індекс (NDWI); Sentinel-2; моніторинг земель; водний стрес.*

Рис.: 22. Табл.: 1. Бібл.: 23.

Актуальність теми дослідження. Земля як просторовий базис господарської діяльності одночасно виступає природним ресурсом, засобом виробництва та ключовим елементом екосистемної рівноваги. Саме поєднання цих функцій зумовлює складність оцінки змін землекористування, особливо в умовах різких природних і антропогенних порушень. Вона виступає просторовою основою господарської діяльності, джерелом родючих ґрунтів, регулятором водного балансу та важливим компонентом глобального вуглецевого циклу. В умовах зростання чисельності населення світу та посилення антропогенного навантаження земельні ресурси зазнають дедалі інтенсивнішого використання, що потребує впровадження ефективних механізмів управління та контролю з метою запобігання деградаційним процесам і забезпечення продовольчої безпеки в довгостроковій перспективі [8; 13].

Проблема деградації земель має глобальний характер. За оцінками міжнародних організацій, понад 2 млрд га земель у світі вже зазнали різних форм деградації, що безпосередньо впливає на умови життя більш ніж одного мільярда людей. Значна частина орних земель втратила частину своїх фізичних, хімічних та біологічних функцій, що призводить до зниження продуктивності агроландшафтів і погіршення екологічного стану територій [22]. Негативні процеси землекористування супроводжуються зростанням викидів вуглецю в атмосферу, частка яких, за оцінками дослідників, сягає близько 20 % глобальних антропогенних викидів щороку [19].

Для України проблема ефективного використання земельних ресурсів має особливу актуальність. Країна володіє значним земельно-ресурсним потенціалом, зокрема унікальними чорноземними ґрунтами, які формують основу аграрного виробництва та експортного потенціалу держави. Водночас високий рівень розораності території, інтенсивне сільськогосподарське використання, дефіцит органічних і мінеральних добрив, а також тривалі деградаційні процеси призвели до суттєвого погіршення якісного стану ґрунтового покриву.

© І. Р. Стахів, В. В. Ворох, В. О. Деркач, С. В. Чепіль, 2026

Ситуація ускладняється наслідками повномасштабної військової агресії Російської Федерації, що спричинила значні прямі та непрямі збитки аграрному сектору, забруднення земель вибухонебезпечними предметами та порушення усталених систем землекористування [15].

В умовах сучасних викликів традиційні підходи до оцінки та моніторингу стану земельних ресурсів, що базуються переважно на наземних обстеженнях, не завжди забезпечують необхідну оперативність, повноту та просторову узгодженість даних. Прийняття управлінських рішень на основі фрагментарної або застарілої інформації знижує ефективність землекористування та ускладнює реалізацію принципів сталого розвитку. У зв'язку з цим зростає роль сучасних геоінформаційних технологій (ГІС) і даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), які забезпечують отримання актуальних, об'єктивних і масштабованих просторових даних про стан земельного покриву та його динаміку [4; 1].

Технології ДЗЗ дозволяють здійснювати систематичний моніторинг землекористування на різних просторових рівнях — від локального до глобального — з використанням багатоспектральних, гіперспектральних, радарних та лідарних даних. Супутникові місії нового покоління, зокрема програми Sentinel і Landsat, забезпечують регулярне оновлення інформації з високою просторовою та часовою розрізненністю, що є особливо важливим для аналізу деградаційних процесів, змін у структурі угідь, стану рослинного покриву та водних ресурсів. Поєднання даних ДЗЗ з аналітичними можливостями ГІС створює інформаційну основу для інтеграції природних, соціально-економічних та правових аспектів землекористування [10; 14].

Застосування ГІС і ДЗЗ відкриває широкі можливості для вирішення практичних завдань землеустрою, зокрема інвентаризації земель, оцінки їх якісного стану, виявлення деградаційних осередків, аналізу просторово-часової динаміки землекористування та підтримки прийняття управлінських рішень. Отримані за допомогою цих технологій дані дозволяють оперативно оцінювати наслідки природних і антропогенних впливів, прогнозувати розвиток негативних процесів та формувати науково обґрунтовані рекомендації щодо раціонального використання і відновлення земельних ресурсів. Саме тому комплексне застосування технологій ГІС та ДЗЗ є необхідною умовою формування сучасної системи ефективного землекористування в Україні.

За таких умов застосування ГІС і даних ДЗЗ набуває особливої актуальності для оцінки змін землекористування в умовах сучасних екологічних і соціально-економічних викликів.

Особливої гостроти зазначені проблеми набули для південних регіонів України після руйнування Каховської гідроелектростанції в червні 2023 року. Порушення гідрологічного режиму призвело до різкого зниження рівня води, оголення значних площ дна водосховища та трансформації прибережних і заплавних земель. За таких умов виникла необхідність оперативної та об'єктивної оцінки змін землекористування з використанням сучасних геоінформаційних технологій і даних дистанційного зондування Землі.

Постановка проблеми. Незважаючи на активний розвиток ГІС і доступність супутникових даних відкритого доступу, на практиці землеустрою залишається недостатньо опрацьованим аспект інтеграції даних ДЗЗ у процеси оперативного аналізу та управління земельними ресурсами. Більшість управлінських рішень і надалі ґрунтується на фрагментарних або застарілих даних, що ускладнює своєчасне виявлення просторових змін і оцінку їхніх масштабів.

У практиці землеустрою такі методичні обмеження особливо проявляються під час аналізу кризових змін земного покриву, зумовлених раптовими гідрологічними порушеннями. Відсутність кількісно обґрунтованих підходів до оцінки втрати водних площ і трансформації прибережних територій ускладнює прийняття управлінських рішень щодо подальшого використання та відновлення земель. Це зумовлює необхідність застосування ГІС і матеріалів ДЗЗ як інструментів оперативного просторового аналізу змін землекористування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика раціонального використання та охорони земельних ресурсів широко висвітлена у працях вітчизняних і зарубіжних науковців. У роботах українських дослідників значну увагу приділено теоретичним і прикладним аспектам землеустрою, земельного кадастру та управління земельними відносинами, зокрема питанням деградації ґрунтів, екологічної безпеки землекористування та формування сталих моделей використання земель. У цьому контексті у працях А. М. Третяка, Л. Я. Новаковського, В. І. Зацерковного, Д. С. Добряка та інших авторів обґрунтовуються підходи до оцінки стану земель і необхідність удосконалення системи управління земельними ресурсами з урахуванням екологічних факторів.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із використанням ГІС як інструменту аналізу та інтеграції просторових даних. У наукових публікаціях зазначається, що ГІС забезпечують можливість поєднання різнорідної інформації про земельний покрив, природні умови та господарську діяльність, що створює основу для просторового аналізу і підтримки прийняття управлінських рішень у сфері землекористування [4, 21]. Водночас більшість робіт у цьому напрямі зосереджена на загальних методичних аспектах побудови ГІС-моделей, тоді як прикладні питання використання таких моделей для оперативного моніторингу змін землекористування залишаються недостатньо деталізованими.

Значна кількість зарубіжних досліджень присвячена застосуванню даних ДЗЗ для аналізу земного покриву та водних об'єктів. У працях S. McFeeters, B. Gao, показано ефективність використання спектральних індексів для картографування водної поверхні та оцінки її динаміки за супутниковими знімками [18, 9]. Разом із тим такі дослідження, як правило, орієнтовані на вирішення окремих тематичних задач ДЗЗ і не завжди розглядають результати аналізу в контексті практичних потреб землеустрою та управління земельними ресурсами. Водночас у зазначених роботах основна увага приділяється методичним аспектам дистанційного зондування, тоді як питання практичного використання отриманих результатів у системі землеустрою залишаються недостатньо висвітленими.

Незважаючи на наявність наукових досліджень та значного обсягу супутникових даних відкритого доступу, питання комплексного використання ГІС і матеріалів ДЗЗ для оцінки просторово-часових змін землекористування залишаються недостатньо систематизованими. Зокрема, потребують подальшого опрацювання методичні підходи до інтеграції спектральних індексів у практику землеустрою з метою кількісної оцінки трансформацій земельного покриву та підтримки прийняття управлінських рішень. Це зумовлює необхідність проведення досліджень, спрямованих на обґрунтування практично орієнтованих методів використання даних ДЗЗ і ГІС для підвищення ефективності землекористування. Особливо це стосується територій, що зазнали раптових гідрологічних і антропогенних порушень.

Водночас аналіз наукових публікацій свідчить, що питання використання спектральних індексів для кількісної оцінки трансформації землекористування в умовах раптового осушення великих водосховищ залишаються недостатньо опрацьованими. Більшість досліджень зосереджена на загальному картографуванні водних об'єктів або екологічних наслідках змін, тоді як інтеграція результатів дистанційного зондування в практику землеустрою потребує подальшого методичного обґрунтування.

Метою роботи є кількісна оцінка просторово-часової динаміки водної поверхні в межах досліджуваної території на основі даних Sentinel-2 та індексу NDWI з подальшою оцінкою змін структури землекористування.

Виклад основного матеріалу. Землекористування розглядається як складна соціально-економічна та природна система, що відображає способи використання земельних ресурсів у межах певної території з урахуванням її природних властивостей, функціонального призначення та правового режиму. У наукових дослідженнях підкреслюється, що земля одночасно виступає просторовою основою розміщення господарських об'єктів, засобом виробництва у сільському господарстві та ключовим компонентом природного середовища, що зумовлює необхідність її раціонального та екологічно збалансованого використання [3].

Формування системи землекористування відбувається під впливом комплексу природних, економічних і правових чинників. Порушення збалансованості між цими складовими призводить до низки негативних процесів, таких як деградація ґрунтів, порушення водного режиму, зниження родючості земель та неефективної просторової організації територій. Узагальнені проблеми у сфері земельних відносин і землекористування, характерні для сучасного етапу розвитку земельної сфери України, проілюстровано на рис. 1 [2].

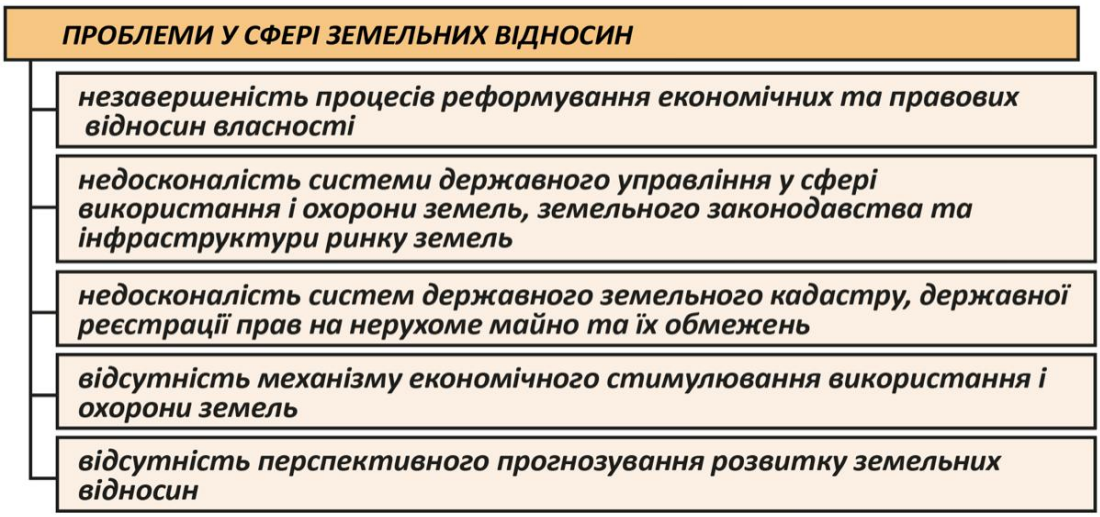


Рис. 1. Проблеми у сфері земельних відносин

Виявлені проблеми у сфері земельних відносин свідчать про необхідність переосмислення підходів до управління земельними ресурсами та посилення ролі землеустрою як системоутворюючого елементу державної земельної політики. За умов фрагментарності нормативно-правового регулювання, недостатньої узгодженості управлінських рішень і зростання антропогенного навантаження на земельні ресурси традиційні механізми регулювання виявляються малоефективними. У таких обставинах землеустрій перестає бути суто технічним інструментом і набуває значення комплексного механізму впорядкування земельних відносин.

Сучасна система землеустрою має забезпечувати інтеграцію правових, екологічних, економічних і просторових чинників у процесі прийняття управлінських рішень. Це передбачає перехід від ізольованого розв’язання окремих землевпорядних завдань до формування узгодженої системи просторового планування, орієнтованої на раціональне використання земель, збереження природного потенціалу та збалансований розвиток територій. Особливої актуальності такий підхід набуває для регіонів із високим рівнем трансформації земного покриву, де необхідно враховувати як природні обмеження, так і соціально-економічні потреби.

Важливою умовою реалізації зазначених підходів є належне інформаційне забезпечення процесів землеустрою. Формування обґрунтованих управлінських рішень потребує наявності актуальних, повних і просторово узгоджених даних про стан земельних ресурсів та динаміку їх змін. У цьому контексті зростає значення сучасних інформаційно-аналітичних інструментів, які дозволяють перейти від статичних облікових характеристик до системного аналізу просторових процесів землекористування.

Застосування ГІТ і матеріалів ДЗЗ у системі землеустрою створює можливості для оперативного виявлення проблемних ділянок, оцінки наслідків антропогенного впливу та прогнозування розвитку земельних процесів. Це забезпечує науково обґрунтовану основу для формування адаптивних управлінських рішень і підвищення ефективності використання земельних ресурсів. Узагальнення зазначених підходів дозволяє виокремити основні напрями вирішення проблем у сфері землеустрою, що відображено на рис. 2.

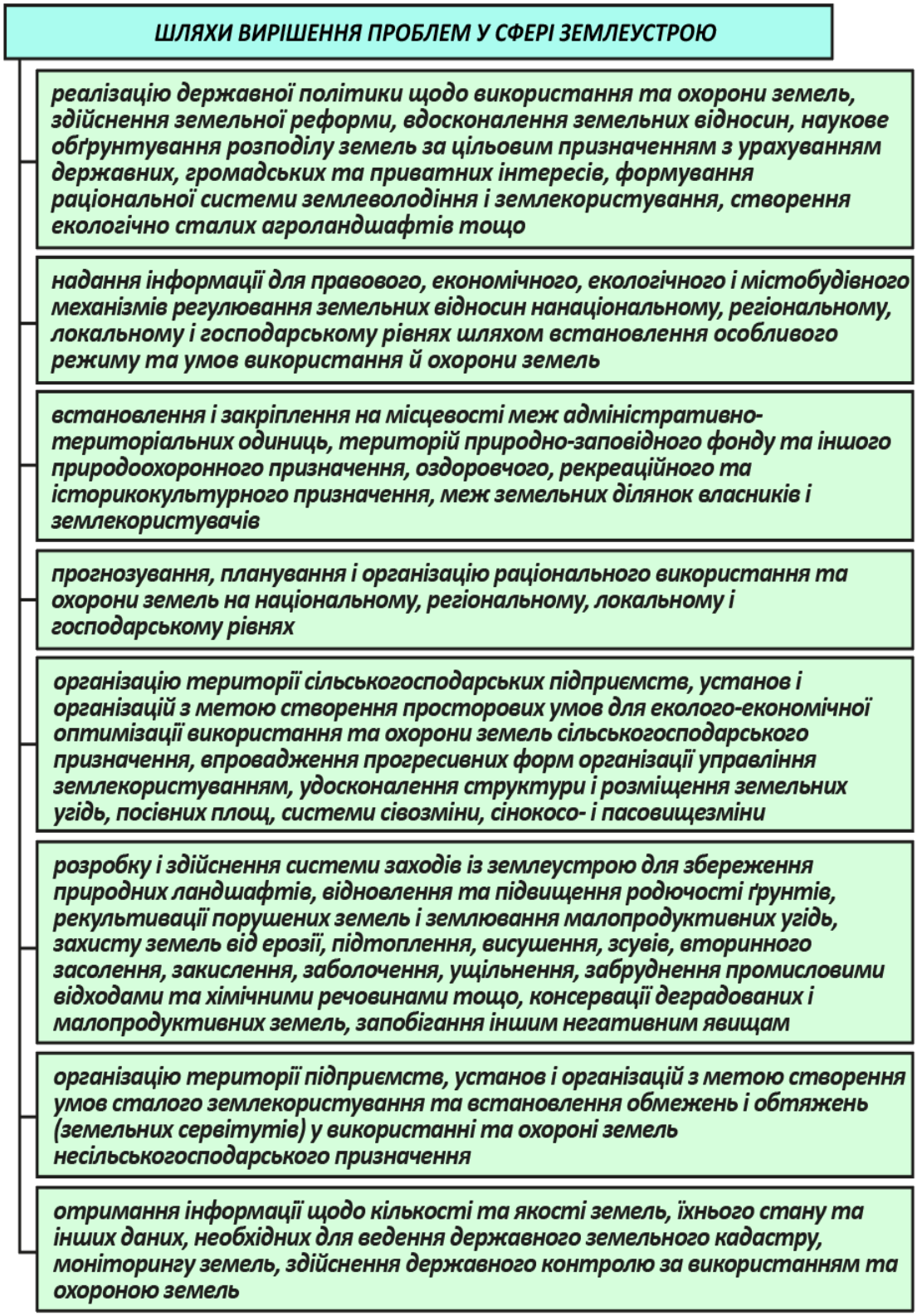


Рис. 2. Шляхи вирішення проблем у сфері землеустрою

Реалізація визначених напрямів удосконалення землеустрою потребує їх чіткого інституційного та функціонального закріплення в системі управління земельними ресурсами. Землеустрій у цьому контексті виступає ключовим механізмом реалізації державної земельної політики, оскільки забезпечує узгодження правових, організаційних,

технічних та екологічних аспектів використання й охорони земель. Функціональний підхід дозволяє розглядати землеустрій не лише як сукупність окремих землевпорядних робіт, а як цілісну систему взаємопов'язаних дій, спрямованих на формування збалансованого землекористування та просторового розвитку територій.

Відповідно до чинного законодавства України, землеустрій спрямований на раціональне використання та охорону земель, забезпечення екологічної безпеки й створення передумов для сталого розвитку. У межах системи управління земельними ресурсами він виконує низку взаємодоповнювальних функцій, серед яких провідну роль відіграють екологічна, правова, організаційна та технічна. Їх реалізація передбачає перехід від фрагментарного регулювання земельних відносин до системного просторового планування, що ґрунтується на узгодженні землекористування з природними умовами, рівнем господарського освоєння та стратегічними цілями розвитку регіонів.

У такому підході землеустрій розглядається як інструмент державного управління, за допомогою якого забезпечується інтеграція екологічних вимог, економічних інтересів і соціальних потреб у процесі прийняття управлінських рішень. Сукупність функцій і завдань землеустрою в системі державного управління земельними ресурсами узагальнено та систематизовано на рис. 3 [2].

Рис. 3. Функції та завдання землеустрою

Функції землеустрою відображають багатогранний характер його впливу на процеси використання та охорони земель і охоплюють взаємопов'язані правові, екологічні, технічні, організаційні та економічні аспекти. Кожна з цих функцій виконує окрему роль, проте їх практична реалізація можлива лише за умови комплексного застосування в межах єдиної системи управління земельними ресурсами.

Правова функція землеустрою спрямована на забезпечення законності землекористування, захист прав власників і користувачів земель, а також дотримання встановлених обмежень і режимів використання територій. Вона створює нормативну основу для реалізації землевпорядних рішень та контролю за їх виконанням. Екологічна функція полягає у збереженні природних властивостей земель, запобіганні деградаційним процесам і забезпеченні екологічної безпеки землекористування шляхом урахування природних умов та екологічних обмежень.

Технічна та організаційна функції землеустрою забезпечують практичну реалізацію землевпорядних заходів і включають встановлення меж земельних ділянок, інвентаризацію земель, просторове впорядкування територій і планування землекористування. Водночас економічна функція пов’язана з оцінкою ефективності використання земель, обґрунтуванням напрямів їх господарського освоєння та формування передумов економічно обґрунтованого просторового розвитку територій.

Сукупна реалізація зазначених функцій формує цілісну систему землеустрою, яка забезпечує узгодження інтересів держави, територіальних громад і землекористувачів, а також створює передумови для сталого розвитку земельних відносин.

У межах цього дослідження землеустрій розглядається не як сукупність окремих видів документації (рис. 4), а як інструмент просторового аналізу та управління земельними ресурсами (рис. 5). У цьому контексті застосування ГІС і матеріалів ДЗЗ дозволяє наповнити землевпорядні рішення актуальною просторовою інформацією, забезпечити кількісну оцінку змін землекористування та підвищити обґрунтованість управлінських рішень у кризових умовах [1].

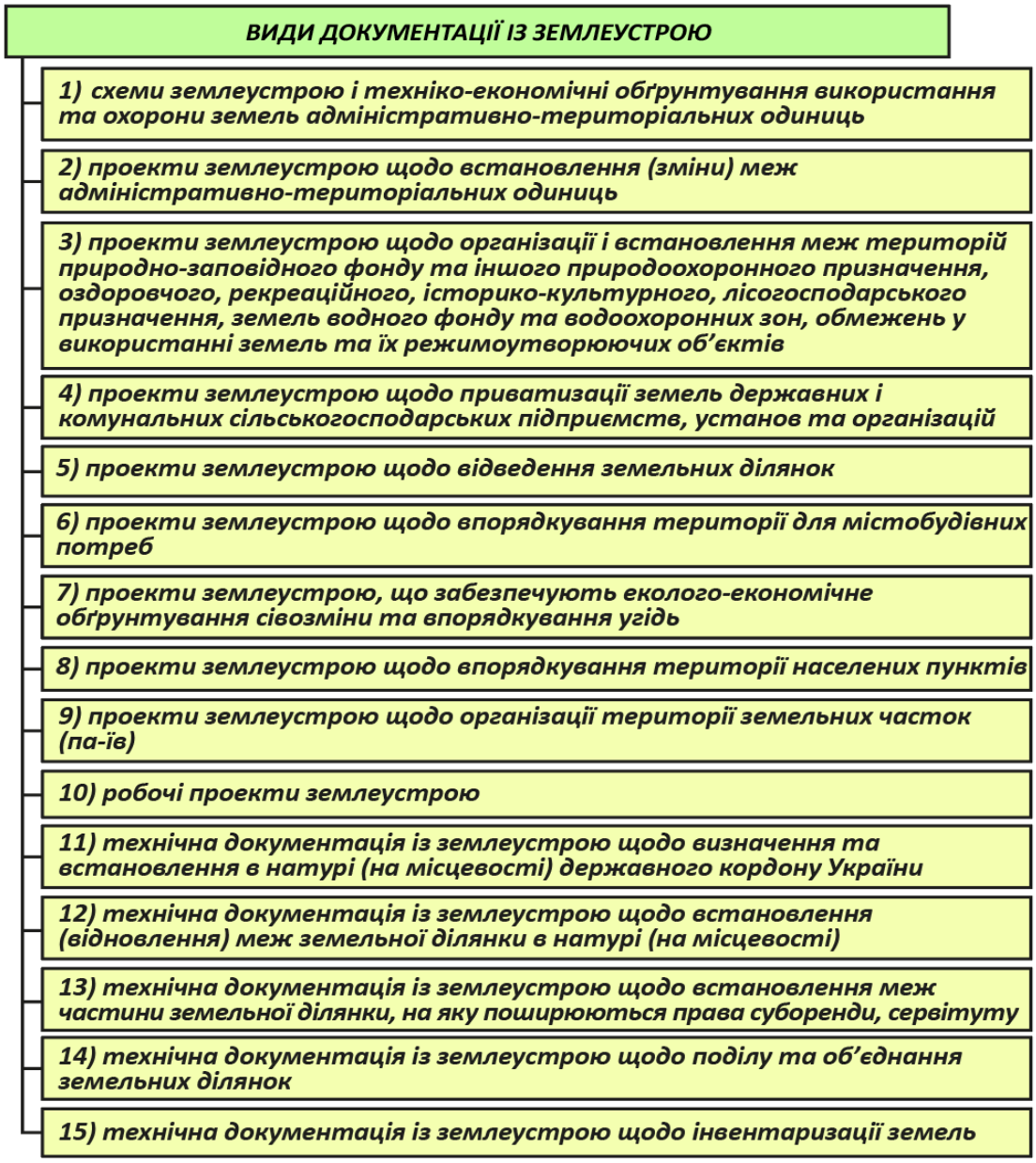


Рис. 4. Види документації із землеустрою

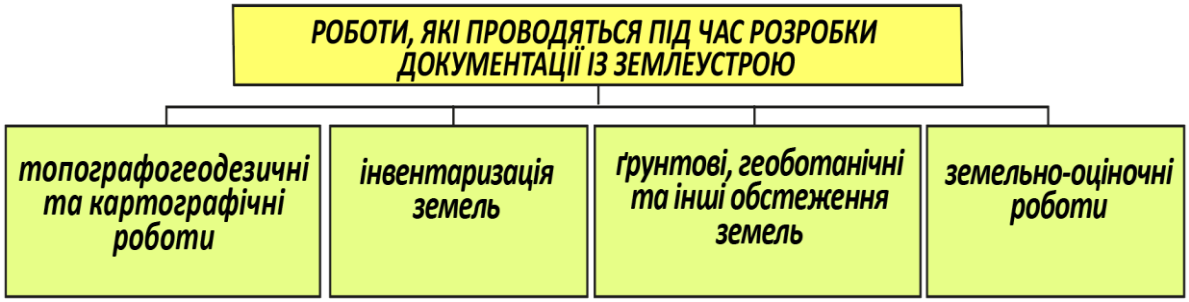


Рис. 5. Роботи, що виконуються під час розроблення документації із землеустрою

Важливе значення в процесі землекористування має оцінка стану земельних ресурсів та умов їх використання, що визначається природними й антропогенними чинниками. Земельний фонд України відзначається різноманітністю ґрунтового покриву та істотною просторовою мінливістю агроекологічних умов. Такі особливості зумовлюють неоднаковий рівень родючості земель, їх екологічну стійкість і чутливість до негативних впливів.

Просторовий розподіл агроекологічних характеристик, наявність несприятливих природно-антропогенних процесів, а також техногенне забруднення ґрунтів істотно впливають на напрями та інтенсивність використання земель. Урахування зазначених чинників є необхідним під час обґрунтування землевпорядних рішень та оцінки сучасного стану землекористування. Узагальнену характеристику агроекологічного стану земель і наявних обмежень землекористування в межах території України наведено на рис. 6-10.

Рис. 6. Карта агроекологічної оцінки ґрунтів України [5]

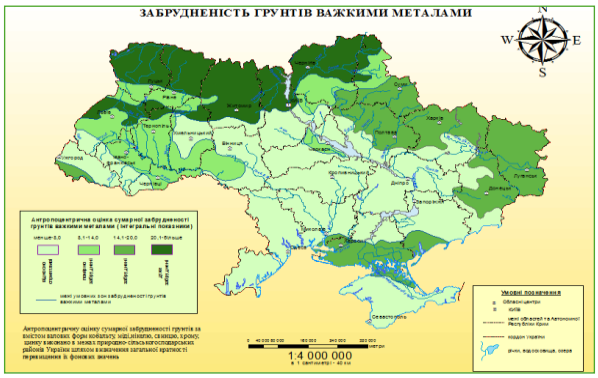


Рис. 7. Карта забрудненості ґрунтів важкими металами [5]

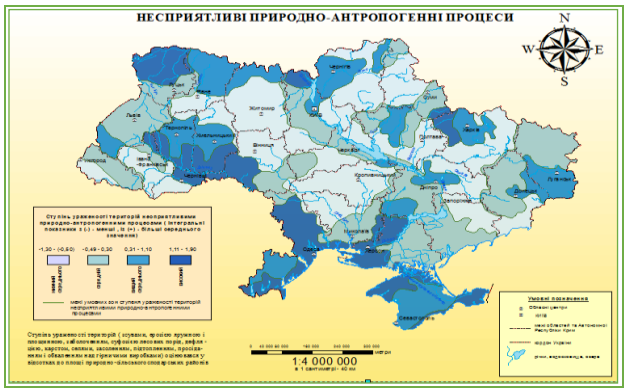


Рис. 8. Карта несприятливих природно-антропогенних процесів [5]

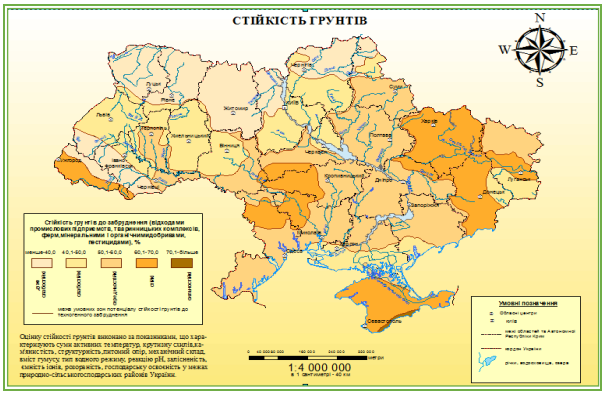


Рис. 9. Карта стійкості ґрунтів України [5]

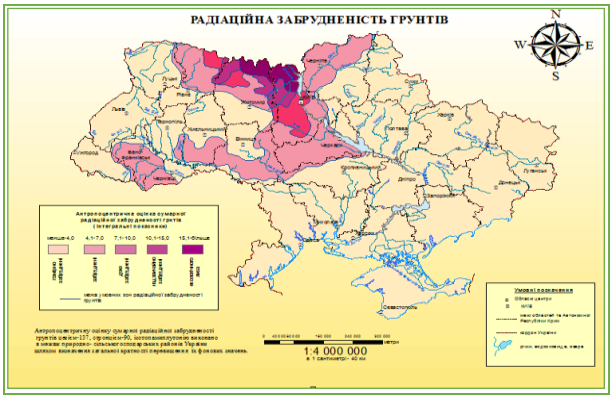


Рис. 10. Карта радіаційного забруднення ґрунтів України

Наведені характеристики землекористування та агроекологічного потенціалу є базою для аналізу територій, що зазнали різких антропогенних трансформацій, зокрема і внаслідок порушення гідрологічного режиму. Отже, землекористування слід розглядати як багатокомпонентну систему, у межах якої земля виступає одночасно природним ресурсом, об'єктом господарської діяльності та елементом просторової організації території. Сучасні виклики у сфері використання земельних ресурсів зумовлюють необхідність застосування інструментів, здатних забезпечити кількісну оцінку змін у структурі угідь та стані земель, що обґрунтовує доцільність використання ГІС і матеріалів ДЗЗ.

Об'єктом дослідження є територія осушеної частини Каховського водосховища та прилеглі земельні ділянки, трансформація яких після порушення гідрологічного режиму зумовила істотні зміни структури землекористування. Досліджувана ділянка охоплює прибережні та заплавні землі Дніпра, які зазнали суттєвих змін після руйнування гідротехнічної споруди, що зумовило різке зниження рівня води та оголення значних площ дна водосховища.

Вихідними даними слугували багатоспектральні супутникові знімки Sentinel-2, отримані в межах програми Copernicus [7]. Просторова розрізненість знімків (10 м) у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах забезпечує можливість детального аналізу змін водної поверхні. Для візуальної перевірки та просторової верифікації результатів додатково використовувалися матеріали платформи Google Earth Engine [12].

Для виділення водної поверхні у межах досліджуваної території використано нормалізований диференційний водний індекс (NDWI), вибір якого зумовлений його чутливістю до змін співвідношення між відбивною здатністю води та суходолу в зеленому та ближньому інфрачервоному діапазонах, який розраховувався за формулою:

$$\mathrm{NDWI} = \frac{\mathrm{B}_{green} - \mathrm{B}_{NIR}}{\mathrm{B}_{green} + \mathrm{B}_{NIR}}, \quad (1)$$

де B_{green}— відбивна здатність у зеленому спектральному каналі (B3 Sentinel-2),

B_{NIR}— відбивна здатність у ближньому інфрачервоному каналі (B8 Sentinel-2).

Розрахунок індексу NDWI та класифікація пікселів виконувалися з використанням аналітичного скрипту в середовищі Copernicus Browser. Пікселі з додатними значеннями NDWI належать до класу водної поверхні, тоді як від'ємні значення відповідали суходолу.

Площа водної поверхні визначалася шляхом автоматизованого підрахунку кількості пікселів, класифікованих як водні, з подальшим перерахунком у площинні показники за формулою:

$$S = N \star A_{pix}, \quad (2)$$

де S— площа водної поверхні, км^2;

N — кількість пікселів, віднесених до класу води.

A_{pix}— площа одного пікселя супутникового знімка Sentinel-2.

Моніторинг ефективного використання регіональних земельних ресурсів є комплексним процесом, що передбачає систематичне спостереження, оцінювання та аналіз стану земель з метою забезпечення їх раціонального використання і збереження природного потенціалу. Ефективність землекористування охоплює не лише економічні показники, а й екологічну стійкість, соціальну значущість та відповідність природним умовам конкретної території. У цьому контексті ГІС виступають ключовим інструментом інтеграції просторових, статистичних і тематичних даних, що дозволяє формувати цілісне уявлення про стан земельних ресурсів на регіональному рівні [8].

Важливим завданням моніторингу є виявлення деградаційних процесів, зокрема ерозії ґрунтів, вторинного засолення, заболочування або пересихання територій. Такі процеси мають просторово неоднорідний характер і зумовлені поєднанням природних чинників та антропогенного впливу. Геоінформаційний підхід дає змогу аналізувати динаміку цих змін у часі, порівнювати різні часові зрізи та визначати тенденції трансформації земного покриву [17].

Особливу роль у системі моніторингу відіграє водний фактор, оскільки доступність водних ресурсів безпосередньо впливає на продуктивність земель, особливо в аграрних регіонах. Зміни гідрологічного режиму призводять до трансформації землекористування та зростання екологічних ризиків. Застосування ГІС і даних ДЗЗ дозволяє оцінювати просторовий розподіл водозабезпечення земель і виявляти зони підвищеного водного стресу [20].

Спектральні індекси є узагальненими числовими показниками, що обчислюються на основі комбінацій спектральних каналів і використовуються для підвищення інформативності супутникових зображень. Їх застосування дає змогу зменшити вплив зовнішніх чинників і зосередити аналіз на конкретних властивостях земної поверхні, зокрема стані рослинності, вологості ґрунтів та наявності водних об’єктів [16].

Індекс NDWI займає особливе місце серед водних індексів, оскільки він спеціально розроблений для виділення відкритих водних поверхонь. Теоретичною основою індексу є контраст між високим відбиттям води у зеленому діапазоні та низьким відбиттям у ближньому інфрачервоному спектрі, що дозволяє ефективно відокремлювати водні об’єкти від суходолу [18]. Інтерпретація значень NDWI потребує врахування природних і антропогенних особливостей території, оскільки проміжні значення можуть відповідати вологим заплавам або перехідним станам зволоження [23]. Разом із тим застосування фіксованого порогового значення NDWI (NDWI > 0) може призводити до певних похибок у випадках наявності вологих ґрунтів, мілководдя або ділянок із водною рослинністю. У зв’язку з цим результати спектрального аналізу інтерпретувалися з урахуванням візуальної перевірки за оптичними зображеннями та просторового контексту досліджуваної території.

Сучасні веборієнтовані геоінформаційні платформи суттєво розширюють можливості використання ГІС та ДЗЗ у практиці моніторингу земельних ресурсів. Вони забезпечують інтерактивний доступ до супутникових даних і інструментів їх аналізу без потреби використання спеціалізованого програмного забезпечення, що підвищує оперативність і доступність просторового аналізу [11].

Однією з ключових ініціатив у цій сфері є програма Copernicus Європейського Союзу, яка надає відкритий доступ до даних супутників серії Sentinel. Дані Sentinel-2 широко застосовуються для аналізу земельних і водних ресурсів завдяки високому просторовому та спектральному розрізненню [6].

Для практичної оцінки стану земельних ресурсів використано вебплатформу Copernicus Browser [7], інтерфейс якої наведено на рис. 11.

Територією дослідження обрано район Каховської гідроелектростанції та прилеглу частину колишнього Каховського водосховища, що зазнала значних змін після руйнування греблі 05.06.2023р. (рис. 12).

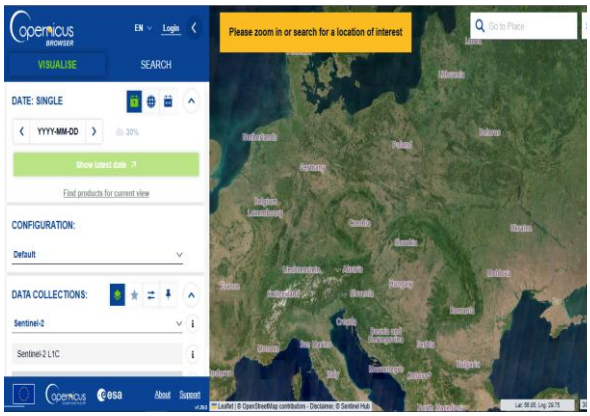


Рис. 11. Інтерфейс платформи Copernicus Browser

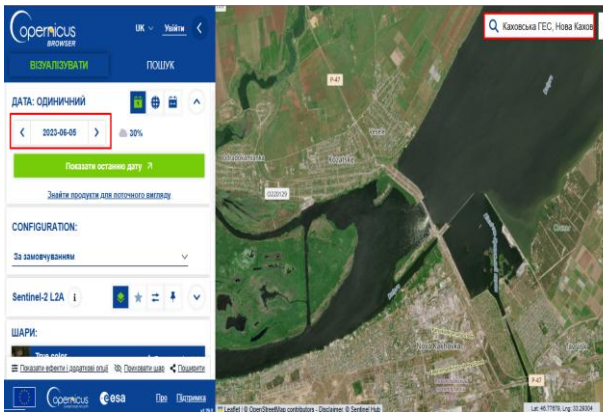


Рис. 12. Задання території дослідження та дати зйомки

У межах платформи було використано стандартні візуальні шари та користувацький аналітичний шар на основі скриптів JavaScript. Набір доступних шарів Sentinel-2 наведено на рис. 13, а процес активації та налаштування користувацького шару Custom Script — на рис. 14–15.

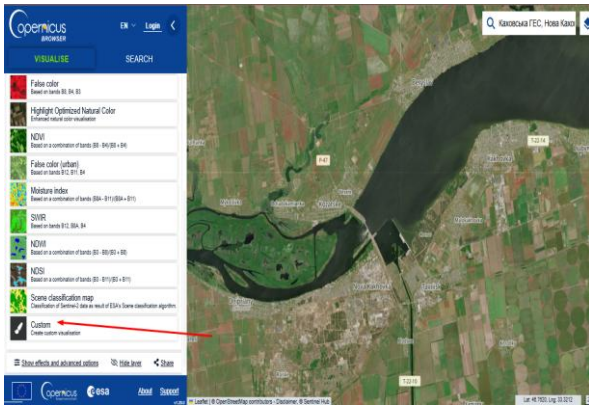


Рис. 13. Набір доступних шарів Sentinel-2 у Copernicus Browser

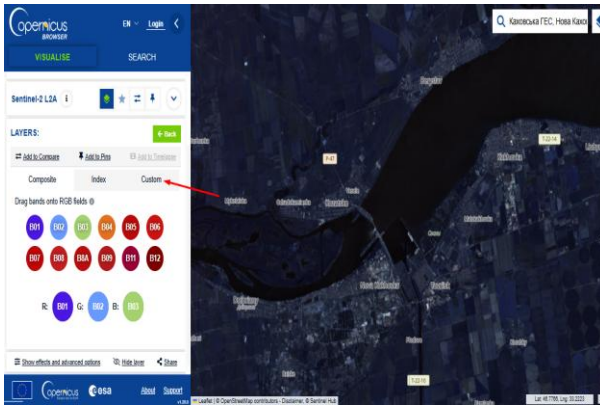


Рис. 14. Активація користувацького шару Custom Script

Розрахунок індексу NDWI дозволив отримати серію карт просторового розподілу водних об’єктів і вологих поверхонь. Стан території безпосередньо після події представлено на рис. 16, де ще зберігаються значні площі з позитивними значеннями індексу.

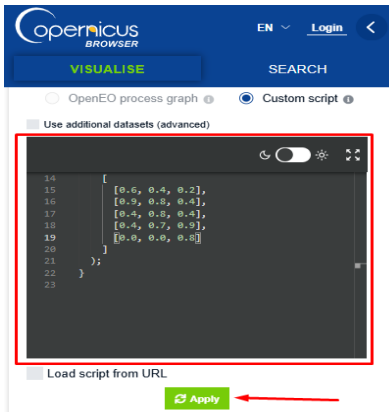


Рис. 15. Поле введення користувацького коду для розрахунку NDWI

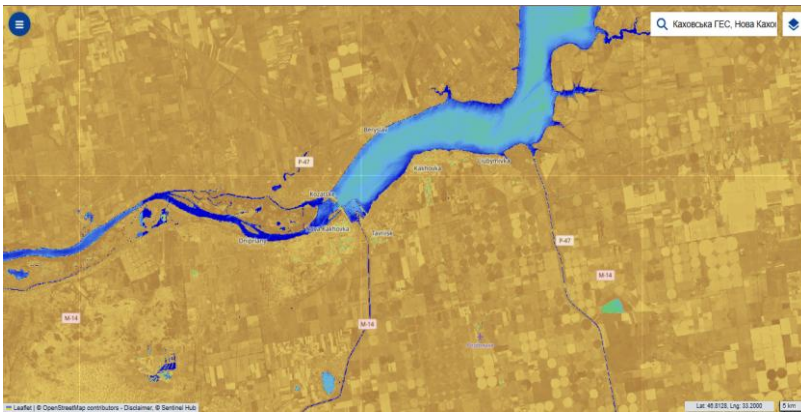


Рис. 16. Просторовий розподіл NDWI станом на 05.06.2023 р.

Подальшу динаміку трансформації території на 18.06.2023 відображено на рис. 17–18, що свідчить про швидке скорочення водних площ.

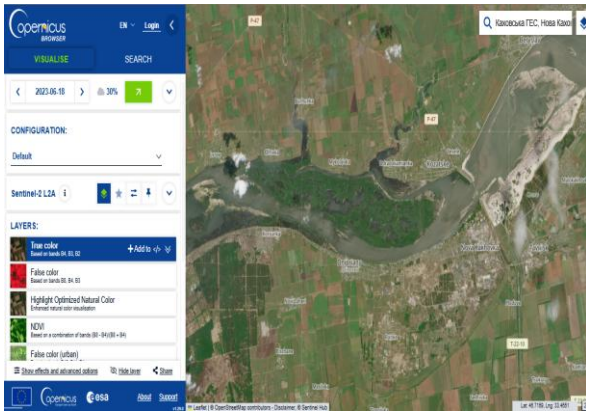


Рис. 17. Візуальний стан території (True Color) станом на 18.06.2023 р.

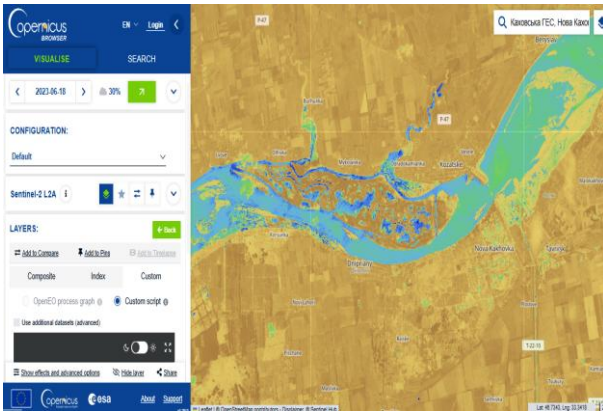


Рис. 18. Розподіл NDWI станом на 18.06.2023 р.

Результати станом на 30.06.2023 (рис. 19) демонструють домінування від'ємних значень NDWI, що вказує на повну втрату ознак водного покриву на значній частині території.

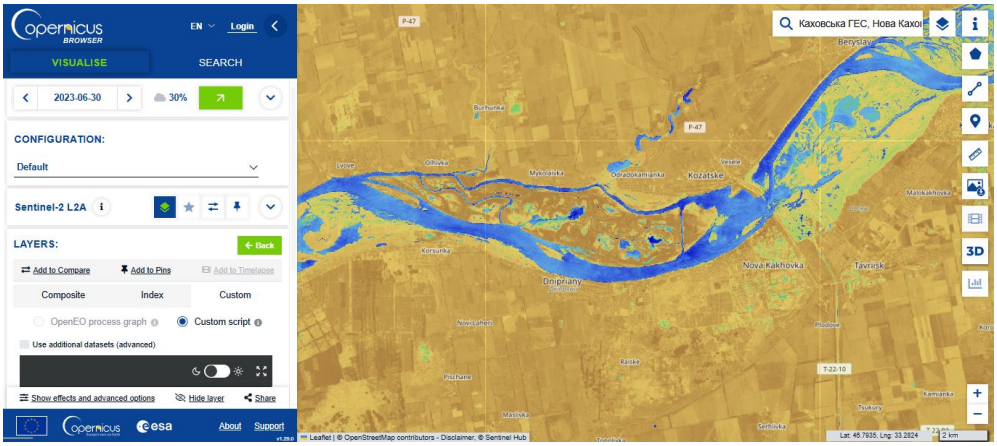


Рис. 19. Подальша деградація водних площ за NDWI на 30.06.2023 р.

Максимальний прояв водного стресу зафіксовано на початку серпня 2023 року (рис. 20–21), коли колишнє дно водосховища остаточно трансформувалося у сухі поверхні. Отримані результати підтверджують різке погіршення умов водозабезпечення земель і зниження ефективності їх використання, що підкреслює необхідність застосування ГІС і ДЗЗ для оперативного моніторингу та обґрунтування управлінських рішень.

Рис. 20. NDWI та прояви водного стресу станом на 04.08.2023 р.

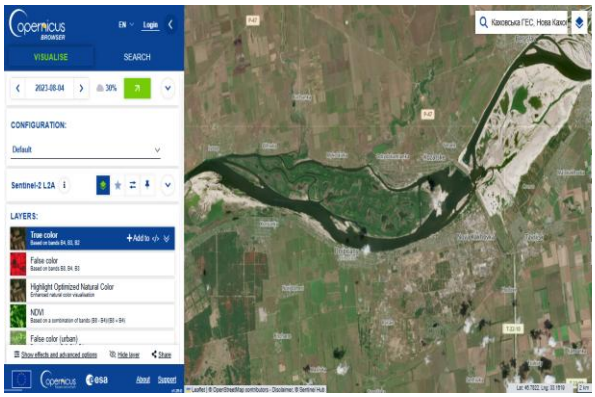


Рис. 21. Візуальне підтвердження осушення території (True Color)

Порівняння візуального зображення у режимі True Color з відповідними картами розподілу індексу NDWI (рис. 21) свідчить про високу узгодженість результатів спектрального аналізу з фактичним станом поверхні. Території, які на NDWI-картах характеризуються від'ємними значеннями індексу, на оптичному зображенні відповідають сухим або слабо зволоженим ділянкам без ознак відкритої води.

Отримані результати підтверджують, що станом на початок серпня 2023 року процес осушення досліджуваної території набув системного характеру, а колишнє дно водосховища втратило функції акумуляції та регулювання водних ресурсів. Це створює передумови для подальшої трансформації землекористування, зростання водного стресу та зниження екологічної стійкості прилеглих земель.

Підрахунок площ водної поверхні, виконаний у середовищі Google Earth Engine (рис. 22) [12], дозволив перейти від візуальної оцінки змін землекористування до їх кількісного аналізу. Автоматизована обробка супутникових знімків Sentinel-2 із застосуванням індексу NDWI забезпечила об'єктивне визначення площ ділянок, що зберігали ознаки відкритої води на різних етапах трансформації території.

Рис. 22. Підрахунок площ деградації за платформою Google Earth Engine.

Отримані значення площ водної поверхні чітко відображають динаміку деградації Каховського водосховища після порушення гідрологічного режиму. Уже впродовж перших тижнів після події спостерігається різке скорочення водної акваторії, що свідчить про високу чутливість водних екосистем до антропогенних впливів. Подальше зменшення площ води в літній період свідчить про формування стійкого водного стресу та втрату водорегулювальної функції території.

Для узагальнення результатів просторового аналізу та переходу від візуальної інтерпретації до кількісної оцінки було виконано підрахунок площ водної поверхні за результатами обробки даних у середовищі Google Earth Engine, що представлено в табл. 1.

Таблиця 1 – Динаміка площі водної поверхні за індексом NDWI на території дослідження

Дата зйомки	Період агрегації	Площа водної поверхні, км^2	Коментар
05.06.2023	01–07.06.2023	179.37	Початковий стан після руйнування греблі
07.06.2023	07–13.06.2023	—	Недостатня кількість валідних пікселів після маскування хмар
18.06.2023	12–18.06.2023	46.21	Початковий етап осушення
30.06.2023	20–26.06.2023	21.32	Подальша деградація водних площ

Примітка. *Площа водної поверхні визначена шляхом класифікації пікселів із додатними значеннями індексу NDWI (NDWI > 0) на основі супутникових знімків Sentinel-2 у середовищі Google Earth Engine.*

Узагальнення отриманих результатів свідчить, що впродовж червня 2023 року площа відкритої водної поверхні в межах досліджуваної території скоротилася більш ніж на 85 %, що є індикатором масштабної трансформації землекористування та втрати водорегулювальної функції Каховського водосховища.

Загалом поєднання картографічного аналізу, спектрального індексу NDWI та автоматизованого підрахунку площ дозволило комплексно оцінити масштаби трансформації землекористування в районі Каховського водосховища. Отримані результати демонструють, що застосування ГІТ і даних ДЗЗ є ефективним інструментом як для оперативного моніторингу кризових змін, так і для формування науково обґрунтованих рішень у сфері управління земельними ресурсами.

Висновки. У статті розглянуто можливості застосування ГІС і даних ДЗЗ для моніторингу стану та ефективності використання земельних ресурсів у регіональному масштабі. На прикладі території Каховського водосховища показано, що просторовий аналіз супутникових знімків дозволяє оперативно виявляти суттєві зміни землекористування, зумовлені порушенням гідрологічного режиму.

Використання багатоспектральних даних Sentinel-2 у поєднанні зі спектральним індексом NDWI дало змогу простежити динаміку скорочення водної поверхні та трансформацію колишніх водних і прибережних територій у суходіл. Отримані картографічні матеріали наочно відображають поступове зростання водного стресу та деградацію водних екосистем упродовж червня–серпня 2023 року.

Кількісна оцінка площ водної поверхні, виконана в середовищі Google Earth Engine, підтвердила результати візуального аналізу та засвідчила різке зменшення водної акваторії в перші тижні після руйнування гідротехнічної споруди. Такі зміни мають безпосередній вплив на ефективність землекористування, умови ведення сільського господарства та екологічну стійкість регіону.

Проведене дослідження підтвердило придатність індексу NDWI для моніторингу змін водної поверхні в умовах різкої трансформації територій. Водночас інтерпретація отриманих результатів потребує урахування локальних природних умов і характеру порушень, що особливо важливо для післякризових територій.

Загалом результати роботи підтверджують об’єктивну необхідність інтеграції ГІС і матеріалів ДЗЗ у практику землеустрою та управління земельними ресурсами, особливо в умовах кризових змін природного середовища. Отримані результати можуть бути використані під час розроблення землевпорядної документації, оцінки наслідків надзвичайних ситуацій та планування відновлення деградованих територій.

Перспективними напрямами подальших досліджень є поєднання водних і вегетаційних спектральних індексів, аналіз процесів вторинної сукцесії на осушених територіях та оцінка потенціалу їх подальшого використання в системі землекористування з урахуванням екологічних обмежень.

Список використаних джерел.

1. Бурачек, В. Г., Зацерковний, В. І., & Железняк, О. О. (2011). *Геоінформаційний аналіз просторових даних*. НДУ імені М. Гоголя.

2. Добряк, Д. С., Третяк, А. М., & Канаш, О. П. (2014). *Землеустрій в Україні: Теорія, методологія, практика*. Аграрна наука.

3. Новаковський, Л. Я. (2013). *Земельні ресурси України та їх використання*. Урожай.

4. Зацерковний, В. І., Тішаєв, І. В., & Віршило, І. В. (2016). ГІС та GPS-технології в агроекологічному моніторингу. *Геодезія, картографія і аерофотознімання, 83*, 112–121.

5. Зацерковний, В. І. (2014). Геоінформаційні системи і системи дистанційного зондування Землі в задачах ефективного землекористування. *Математичне моделювання в економіці*, (1), 40–48.

6. Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: Esa's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment, 120*, 25–36. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026.

7. European Commission. (2023). *Copernicus programme*. European Union. https://www.copernicus.eu

8. FAO. (2017). *Voluntary guidelines for sustainable soil management*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

9. Gao, B.-c. (1996). NDWI–A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, *58*(3), 257–266. https://doi.org/10.1016/s0034-4257(96)00067-3.

10. Giri, C. P. (2012). Brief overview of remote sensing of land cover. In C. P. Giri (Ed.), *Remote sensing of land use and land cover: Principles and applications* (pp. 1–10). CRC Press. https://doi.org/10.1201/b11964.

11. Goodchild, M. F. (2007). Citizens as sensors: The world of volunteered geography. *GeoJournal*, *69*(4), 211–221. https://doi.org/10.1007/s10708-007-9111-y

12. Google Earth Engine. (n.d.). *Google Earth Engine Code Editor*. https://code.earthengine.google.com/.

13. Ibebuchi, C. C., & Abu, I.-O. (2024). Interpolation of environmental data using deep learning and model inference. *Machine Learning: Science and Technology*. https://doi.org/10.1088/2632-2153/ad4b94.

14. Jensen, J. R., & Cowen, D. J. (1999). Remote sensing of urban/suburban infrastructure and socio-economic attributes. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, *65*(5), 611–622.

15. Kyiv School of Economics (2024). *The impact of Russia's full-scale invasion on Ukraine's agricultural sector.* Kyiv School of Economics.

16. Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). *Remote sensing and image interpretation* (7th ed.). Wiley.

17. Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, *20*(7), 703–726. https://doi.org/10.1080/13658810600661508.

18. McFeeters, S. K. (1996). The use of the normalized water difference (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing, 17*(7), 1425–1432. https://doi.org/10.1080/01431169608948714.

19. Murphy, D., De Vit, C., & Nolet, J. (2009). *Climate change mitigation through land use measures in the agriculture and forestry sectors*. International Institute for Sustainable Development.

20. Turner, B. L., Lambin, E. F., & Reenberg, A. (2003). The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(14), 8080–8085 https://doi.org/10.1073/pnas.1231333100.

21. Tomlinson, R. (2013). *Thinking about GIS: Geographic information system planning for managers* (5th ed.). Esri Press.

22. United Nations. (2001). *Commission on Sustainable Development acting as the preparatory committee for the World Summit on Sustainable Development: Agriculture, land and desertification*. United Nations.

23. Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, *27*(14), 3025–3033. https://doi.org/10.1080/01431160600589179.

References

1. Burachek, V.H., Zatserkovnyi, V. I., & Zhelezniak, O. O. (2011). Heoinformatsiinyi analiz prostorovykh danykh [Geoinformation analysis of spatial data.] *NDU imeni M. Hoholia – Hohol State National University.*

2. Dobriak, D. S., Tretiak, A. M., & Kanash, O. P. (2014). Zemleustrii v Ukraini: Teoriia, metodolohiia, praktyka. [Land management in Ukraine: Theory, methodology, practice] *Ahrarna nauka – Agrarian sciences.*

3. Novakovskyi, L. Ya. (2013). Zemelni resursy Ukrainy ta yikh vykorystannia. [Zemelni resursy Ukrainy ta yikh vykorystannia.] *Urozhai - Harvest.*

4. Zatserkovnyi, V. I., Tischaiev, I. V., & Virshylo, I. V. (2016). GIS and GPS technologies in agroecological monitoring. [HIS ta GPS-tekhnolohii v ahroekolohichnomu monitorynhu.] *Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznimannia - Geodesy, cartography and aerial photography, 83*, 112–121.

5. Zatserkovnyi, V. I. (2014). Heoinformatsiini systemy i systemy dystantsiinoho zonduvannia Zemli v zadachakh efektyvnoho zemlekorystuvannia. [Geographic information systems and remote sensing systems in the context of effective land use.] *Matematychne modeliuvannia v ekonomitsi* - Mathematical modelling in economics, (1), 40–48.

6. Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: Esa's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, *120*, 25–36. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026.

7. European Commission. (2023). *Copernicus programme*. European Union. https://www.copernicus.eu.

8. FAO. (2017). *Voluntary guidelines for sustainable soil management*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

9. Gao, B.-c. (1996). NDWI–A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, *58*(3), 257–266. https://doi.org/10.1016/s0034-4257(96)00067-3.

10. Giri, C. P. (2012). Brief overview of remote sensing of land cover. In C. P. Giri (Ed.), *Remote sensing of land use and land cover: Principles and applications* (pp. 1–10). CRC Press. https://doi.org/10.1201/b11964.

11. Goodchild, M. F. (2007). Citizens as sensors: The world of volunteered geography. *GeoJournal*, *69*(4), 211–221. https://doi.org/10.1007/s10708-007-9111-y.

12. Google Earth Engine. (n.d.). *Google Earth Engine Code Editor*. https://code.earthengine.google.com/.

13. Ibebuchi, C. C., & Abu, I.-O. (2024). Interpolation of environmental data using deep learning and model inference. *Machine Learning: Science and Technology*. https://doi.org/10.1088/2632-2153/ad4b94.

14. Jensen, J. R., & Cowen, D. J. (1999). Remote sensing of urban/suburban infrastructure and socio-economic attributes. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 65*(5), 611–622.

15. Kyiv School of Economics (2024). *The impact of Russia's full-scale invasion on Ukraine's agricultural sector.* Kyiv School of Economics.

16. Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). *Remote sensing and image interpretation* (7th ed.). Wiley.

17. Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, *20*(7), 703–726. https://doi.org/10.1080/13658810600661508.

18. McFeeters, S. K. (1996). The use of the normalized water difference (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing, 17*(7), 1425–1432. https://doi.org/10.1080/01431169608948714.

19. Murphy, D., De Vit, C., & Nolet, J. (2009). *Climate change mitigation through land use measures in the agriculture and forestry sectors*. International Institute for Sustainable Development.

20. Turner, B. L., Lambin, E. F., & Reenberg, A. (2003). The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(14), 8080–8085 https://doi.org/10.1073/pnas.1231333100.

21. Tomlinson, R. (2013). *Thinking about GIS: Geographic information system planning for managers* (5th ed.). Esri Press.

22. United Nations. (2001). *Commission on Sustainable Development acting as the preparatory committee for the World Summit on Sustainable Development: Agriculture, land and desertification*. United Nations.

23. Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, *27*(14), 3025–3033. https://doi.org/10.1080/01431160600589179.

Дата першого надходження статті до видання: 02.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.01.2025

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

UDC 528.9:911.3

Iryna Stakhiv[1], Victor Vorokh[2], Vladislav Derkach[3], Sergiy Chepil[4]

[1]PhD in Geological Sciences, Assistant at the Department of Geoinformatics
Taras Shevchenko National University Vasylkivska Street, 90, Kyiv, 03022, Ukraine,
E-mail: stakhivira@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0007-3090-6988

[2]Graduate Student of the Department of Geoinformatics
Taras Shevchenko National University, Vasylkivska Street, 90, Kyiv, 03022, Ukraine,
E-mail: fainkucha@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0005-0112-8422

[3]Bachelor's Student of the Department of Geoinformatics
Taras Shevchenko National University, Vasylkivska Street, 90, Kyiv, 03022, Ukraine,
E-mail: vladdd120904@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0002-7803-2224

[4]Master's Student of the Department of Geoinformatics
Taras Shevchenko National University, Vasylkivska Street, 90, Kyiv, 03022, Ukraine,
E-mail: chepil.sergey@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0007-9296-1106

GIS AND REMOTE SENSING TECHNOLOGIES FOR EFFICIENT LAND RESOURCE USE

The article examines the possibilities of applying geographic information systems (GIS) and remote sensing (RS) data to monitor the condition and efficiency of land resource use. The study is conducted using the territory of the Kakhovka Reservoir as a case study, which has undergone significant transformations because of disturbances in the hydrological regime. Based on Sentinel-2 satellite imagery and the NDWI index, the spatial-temporal dynamics of the water surface during June–August 2023 are analyzed, enabling a quantitative assessment of the scale of water surface reduction and land transformation.

Using the Copernicus Browser and Google Earth Engine platforms, changes are mapped and a spatial interpretation of the water area is performed. The obtained results indicate a reduction of the open water surface area by more than 85% during June 2023, which serves as an indicator of large-scale land use transformation under conditions of abrupt hydrological disruption and the loss of the water-regulation function of the Kakhovka Reservoir.

Keywords: *land use; geographic information systems (GIS); Earth remote sensing (RS); normalized difference water index (NDWI); Sentinel-2; land monitoring; water stress.*

Fig.: 22. Table: 1. References: 23.

Стахів І. Р., Ворох В. В., Деркач В. О., Чепіль С. В. Технології ГІС та ДЗЗ в ефективному використанні земельних ресурсів. *Технічні науки та технології*, 2026. № 1(43). С. 430-446. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-430-446.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-447-456
УДК 528.8:631.4:502.3:355.48

Олександр Васильович Цвик[1], Тетяна Миколаївна Малік[2]

[1]аспірант ННІ «Інститут геології»
Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)
E-mail: tsvik1603@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0006-5464-2078

[2]кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геоінформатики ННІ «Інститут геології»
Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)
E-mail: malik.tat@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-1362-8433 **ResearcherID**: V-5877-2018

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ДИСТАНЦІЙНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ВПЛИВУ БОЙОВИХ ДІЙ НА ПРИДАТНІСТЬ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ УГІДЬ

Анотація. У статті розроблено методику дистанційної ідентифікації впливу бойових дій на придатність земель для сільськогосподарського використання, що ґрунтується на інтеграції мультиспектральних та радарних супутникових даних, польових спостережень і методів машинного навчання. Обґрунтовано механізми деградації ґрунтів унаслідок воєнних дій, зокрема ерозію, контамінацію токсичними речовинами, втрату органічної речовини та ущільнення. Запропоновано використання спектральних індексів (NDVI, EVI, NBR), SAR-показників і часових трендів для побудови системи діагностичних індикаторів.

Ключові слова: *дистанційне зондування, деградація ґрунтів, бойові дії, придатність земель, машинне навчання, агросистеми.*

Табл.: 2. Рис.: 1. Бібл.: 10.

Актуальність теми дослідження. Повномасштабна агресія російської федерації проти України стала унікальним у світовій практиці кейсом воєнного впливу на агроландшафти, де масштаби екологічних і агроекономічних втрат набули системного та довготривалого характеру. Сільськогосподарські угіддя, що становлять основу продовольчої безпеки держави, одночасно стали просторовим континуумом бойових дій, що призвело до безпрецедентної деградації земельного фонду. Зафіксовані процеси включають руйнування ґрунтового профілю вибуховими навантаженнями, техногенне забруднення важкими металами, нафтопродуктами та вибуховими речовинами, вторинну ерозію, ущільнення ґрунтів важкою технікою, а також руйнування гідромеліоративної інфраструктури. Такі трансформації суттєво редукують агроекологічний потенціал і унеможливлюють сталий обіг земельних ресурсів без попереднього відновлення.

Традиційні інструменти оцінки стану земельних угідь, що передбачають польові дослідження та лабораторний аналіз, у контексті воєнних дій виявляються методологічно та практично обмеженими через ризики безпеки, часову тривалість та високі витрати. Це формує запит на дистанційні, безконтактні та високотехнологічні методи ідентифікації ступеня впливу бойових дій на землі сільськогосподарського призначення. Використання супутникових даних (мультиспектральних, гіперспектральних та радарних) у поєднанні з алгоритмами штучного інтелекту та геоінформаційними системами створює передумови для комплексного моніторингу агроландшафтів у реальному часі, виявлення прихованих форм деградації та картографування рівня придатності земель до сільськогосподарського використання.

В умовах війни в Україні така методика набуває не лише наукового, а і стратегічного значення: вона здатна забезпечити прийняття рішень на рівні державної політики відновлення територій, оптимізацію агровиробництва у постконфліктний період, а також інтеграцію результатів у міжнародні системи оцінки ризиків для глобальних ланцюгів постачання продовольства. Отже, створення систематизованої та структурованої методики дистанційного визначення впливу бойових дій на земельні ресурси України є одним із провідних науково-практичних завдань, яке формує сучасний підхід до питань поствоєнного відновлення та забезпечення продовольчої безпеки [1].

© О. В. Цвик, Т. М. Малік, 2026

Постановка проблеми. Воєнні дії призводять до масштабних і різнотипних порушень земель, однак наявні підходи до їхнього виявлення та оцінювання залишаються фрагментованими й недостатньо адаптованими до умов України. Відсутня систематизована методика, яка б поєднувала розуміння механізмів деградації ґрунтів із комплексним використанням дистанційних, польових і метеорологічних даних. Невизначеність щодо критеріїв попередньої обробки цих даних, вибору діагностичних індикаторів та алгоритмів виявлення змін ускладнює створення надійних моделей оцінки стану земель. Додатковою проблемою є відсутність уніфікованих класифікаційних підходів до оцінювання придатності пошкоджених територій, що зумовлює труднощі в ухваленні рішень щодо відновлення та подальшого використання аграрних ресурсів. Усе це формує потребу у розробленні комплексної, валідаційно підтвердженої системи моніторингу, яка забезпечить практичну підтримку управлінських рішень у сфері відновлення та сталого розвитку аграрних територій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних дослідженнях проблема дистанційної ідентифікації впливу бойових дій на сільськогосподарські землі аналізується через інтеграцію супутникових даних і алгоритмів машинного навчання. У [2] автори демонструють ефективність використання мультиспектральних та радарних знімків Sentinel для виявлення пошкоджень ґрунтового покриву, тоді як у роботі [3] розроблено інтегрований підхід із використанням статистичних індикаторів і моделей штучного інтелекту. Подібні результати демонструють автори роботи [4], які акцентують на ідентифікації земель, забруднених унаслідок бойових дій. Водночас автори підкреслюють відсутність уніфікованих критеріїв придатності земель та обмеженість польових даних для валідації результатів. Автори роботи [5] підкреслюють необхідність поєднання дистанційного зондування з лабораторними аналізами для оцінки вмісту важких металів. Водночас автори в роботі [6] демонструють значний потенціал супутникових ресурсів для розробки екологічно орієнтованих стратегій управління агросферою.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри значну кількість робіт, присвячених впливу воєнних дій на довкілля, низка ключових аспектів залишається недостатньо опрацьованою. Передусім досі не сформована комплексна методика дистанційної ідентифікації деградації ґрунтів, яка б враховувала специфіку українських ландшафтів і типів воєнних пошкоджень. Недостатньо досліджено, які саме механізми деградації ґрунтів є домінантними у різних зонах бойових дій та як вони відображаються в спектральних, польових та метеорологічних даних.

Невирішеним залишається питання оптимальних процедур попередньої обробки різнотипних даних, вибору діагностичних індикаторів і створення універсальних алгоритмів для надійного виявлення змін стану земель. Окремою прогалиною є відсутність уніфікованої класифікаційної системи оцінки придатності пошкоджених територій, що ускладнює адаптацію результатів досліджень до потреб управління та планування відновлення.

Загалом, наукова спільнота поки не запропонувала цілісного, валідованого інструментарію, який би дозволяв системно та відтворювано оцінювати наслідки бойових дій для земельних ресурсів та інтегрувати результати у практику відновлення аграрних територій. Саме ці невирішені аспекти становлять ядро недосліджених частин загальної проблеми.

Метою статті є розробка комплексної методики дистанційної ідентифікації впливу бойових дій на придатність сільськогосподарських земель шляхом інтеграції мультиджерельних даних дистанційного зондування, польових вимірювань та алгоритмів машинного навчання.

Викладення основного матеріалу. Інтенсивні бойові дії детермінують багатовекторний комплекс деградаційних процесів у ґрунтовому покриві, що мають як прямий, так і латентний характер. До першої групи належать механічні руйнування структури ґрунтів

під дією вибухових навантажень, які спричиняють втрату агрегатної стабільності, порушення порового простору та зменшення водопроникності. Другим блоком впливів виступають ерозійні процеси – як прискорена лінійна та площинна ерозія, так і вітрові дефляційні явища, які посилюються зняттям захисного рослинного покриву та деструкцією мікрорельєфу. Третім і найбільш критичним фактором є хімічна контамінація: акумуляція важких металів (Pb, Cd, Cu, Zn), залишків вибухових речовин, паливно-мастильних матеріалів та персистентних хімічних забруднювачів (ПХЗ), які здатні мігрувати у харчові ланцюги. Четвертий аспект – техногенне ущільнення ґрунтів важкою військовою технікою, що призводить до зниження повітро- і водопроникності та блокування природних біогеохімічних циклів. Сукупність цих механізмів визначає зменшення агроекологічного потенціалу та загрожує довгостроковою втратою продуктивності земель [3].

У контексті воєнного простору традиційні польові методи діагностики виявляються небезпечними та недостатньо репрезентативними, що актуалізує роль технологій дис*танційного зондування* Землі. Серед найінформативніших індикаторів стану агроландшафтів виділяються:

1) індекси рослинності (NDVI, EVI, SAVI), які дозволяють ідентифікувати редукцію фотосинтетично активної біомаси та латентні прояви стресу рослинності, зумовлені як фізичним ушкодженням ґрунту, так і токсичною дією контамінантів;

2) індекси ґрунтової вологи (NDMI, LSWI), чутливі до змін гідрологічного режиму ґрунтів та здатні відображати наслідки ущільнення чи руйнування капілярної структури;

3) радарні індикатори (SAR backscatter, coherence, polarimetric features), які забезпечують високу інформативність щодо мікрорельєфу, текстурних характеристик поверхні та вологості ґрунтів, навіть за умов суцільної хмарності;

4) теплові сигнали (LST, emissivity), що можуть відображати порушення водного балансу, локальні зони підвищеної температури внаслідок вибухів та згоряння органічної речовини;

5) мульти- та гіперспектральний аналіз, який забезпечує детекцію специфічних спектральних підписів забруднювачів та стресових станів рослинності.

Синергія цих показників створює можливості для комплексної діагностики як явних, так і прихованих форм деградації земельних ресурсів [7, с. 278].

Ключовим аналітичним завданням у дистанційній ідентифікації впливу бойових дій є виявлення просторово-часових змін (change detection). Серед традиційних методів застосовуються:

1) порогові підходи (image differencing, vegetation index differencing), які дозволяють фіксувати різницю у спектральних характеристиках між довоєнними та післявоєнними періодами;

2) посткласові порівняння (post-classification comparison), що передбачають незалежну класифікацію даних за часовими зрізами з подальшим аналізом розбіжностей;

3) методи часових рядів (BFAST, CUSUM, LandTrendr), які здатні виявляти переломні точки (breakpoints) у довготривалій динаміці вегетаційних та ґрунтових індикаторів;

4) сучасний етап розвитку дисципліни характеризується інтеграцією методів машинного навчання, що відкривають нові горизонти для автоматизованої класифікації стану земель;

5) алгоритми ансамблевої класифікації (Random Forest, Gradient Boosting), які демонструють високу стійкість до шумових даних;

6) методи опорних векторів (SVM) та нейронні мережі (CNN, LSTM, Transformer), що забезпечують просторово-часову інтерпретацію змін та виявлення комплексних нелінійних закономірностей.

Таким чином, поєднання мультиспектральних і радарних даних із передовими алгоритмічними підходами формує підґрунтя для побудови інтегрованих моделей оцінки придатності земель у постконфліктному середовищі. Це дозволяє не лише картографувати ступінь деградації, але й прогнозувати траєкторії відновлення агроландшафтів на територіях України, що зазнали руйнівного впливу війни [8].

У контексті зазначених теоретико-методологічних засад фундаментальним етапом постає визначення *вхідних джерел даних,* які забезпечують багаторівневу репрезентацію впливу бойових дій на агроландшафти та формують емпіричне підґрунтя для розробки інтегрованих моделей оцінки придатності земель.

Системоутворювальним елементом інформаційної бази виступають космічні дані дистанційного зондування Землі, зокрема мультиспектральні знімки Sentinel-2 та Landsat-8/9, які дозволяють детектувати спектральні відгуки рослинності та ґрунтового покриву з високою точністю у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах. Доповненням є дані SAR-спостережень Sentinel-1**,** що забезпечують незалежність від погодних умов і денного освітлення та відкривають можливості аналізу мікрорельєфу й структурних характеристик поверхні. Для задач, що потребують детальної просторової розрізненості, релевантними є комерційні супутникові платформи (PlanetScope, SkySat), які здатні забезпечувати субметрову розрізненість та оперативне оновлення знімків у динаміці бойових дій [9, с. 326].

Другим критично важливим блоком є *довідкові та векторні шари* – кадастрові межі полів, транспортна інфраструктура, гідромережа, топографічні карти, які забезпечують просторову структуризацію даних та дозволяють інтегрувати супутникову інформацію у контекст правових і господарських реалій.

Для калібрування й валідації дистанційних спостережень необхідним є залучення польових даних: проби ґрунтів для хімічного аналізу (вміст важких металів, залишків вибухових речовин, нафтопродуктів), визначення агрофізичних параметрів (щільність, вологість, гранулометричний склад), а також фотодокументація й опитування локальних аграрних суб’єктів. Такі дані формують референсну основу для побудови моделей машинного навчання та оцінки їхньої точності.

Нарешті, важливим модулем інформаційної системи виступають метеорологічні та гідрометеорологічні дані (температура, кількість опадів, ґрунтова вологість, рівні ґрунтових вод), які визначають динаміку агроландшафтів та дозволяють відокремлювати воєнно зумовлені пошкодження від природних кліматичних флуктуацій.

Таким чином, інтеграція мультиджерельних супутникових, кадастрових, польових та метеорологічних даних забезпечує багатовимірний інформаційний каркас, без якого неможливо здійснити комплексну ідентифікацію впливу бойових дій на сільськогосподарські землі України [6, с. 60–61].

Отримані дані слугують основою для розробки методики їх обробки та аналізу з метою дистанційної ідентифікації впливу бойових дій на землі.

На першому етапі формування інформаційної бази здійснюється попередня обробка даних, яка є критичною умовою коректності подальших аналітичних процедур. Вона включає:

– атмосферну корекцію (методи Sen2Cor, LEDAPS, LaSRC), що дозволяють мінімізувати вплив атмосферних аерозолів і водяної пари на спектральні характеристики;

– маскування хмарності та тіней (Fmask, QA bands, Sen2Cloudless), без чого аналіз у видимому та ближньому ІЧ-діапазоні може бути викривленим;

– фільтрацію радарного шуму (speckle filtering) у SAR-даних (Lee, Frost, Refined Lee), яка підвищує інтерпретаційність радіолокаційних ознак;

– геометричну корекцію та геоприв'язку для забезпечення просторової сумісності мультиджерельних даних;

– ресемплінг до єдиного просторового розділення (наприклад, 10 м для Sentinel- 2 і Sentinel-1), що дозволяє об'єднувати різні датасети в одному аналітичному полі.

Практична реалізація цього етапу можлива в середовищах Google Earth Engine, SNAP (ESA), QGIS або через бібліотеки Python (rasterio, GDAL, sentinelsat) [10, с. 449].

Наступним кроком є формування системи *діагностичних ознак*, які відображають реакцію ґрунтово-рослинного комплексу на бойові впливи:

– Спектральні індекси: NDVI, EVI (стан рослинності), NDMI (вологість), NBR (пожежні впливи, вибухові навантаження), SAVI (ґрунтовий фон).

– Текстурні показники (GLCM – Grey Level Co-occurrence Matrix) з оптичних та SAR-знімків: ентропія, контраст, гомогенність, що відображають мікроструктуру поверхні.

– Поляриметричні ознаки SAR: коефіцієнти розсіювання (VV, VH, HH), крос-поляризаційні співвідношення, коваріаційні матриці, що чутливі до змін рельєфу та вологості.

– Часові тренди: динаміка індексів у багаторічному ряді (наприклад, спад NDVI протягом кількох сезонів як наслідок втрати продуктивності).

Таким чином формується багатовимірний простір ознак, який далі використовується для виявлення змін і класифікації земель.

Для ідентифікації впливу бойових дій застосовуються різнорівневі методи виявлення змін (табл. 1).

Таблиця 1 – Алгоритми виявлення змін

Група методів	Сутність	Практичне застосування	Переваги / Обмеження
Порогові методи	Порівняння значень індексів (NDVI, backscatter) між періодами та визначення змін за фіксованим порогом	Виявлення зниження біомаси після вибухів чи пожеж	Простота, швидкість / низька чутливість, залежність від масштабу
Image differencing	Обчислення різниці пікселів у спектральних / радарних каналах між довоєнним та післявоєнним періодами	Ідентифікація нових кратерів, вирубки, ушкоджених полів	Висока деталізація / чутливість до атмосферних і сезонних факторів
Посткласові методи	Незалежна класифікація знімків у різні моменти часу з подальшим порівнянням результатів	Карта «збережені / змінені» землі	Добра інтерпретація / залежність від точності класифікації
Time-series break detection (BFAST, CUSUM, LandTrendr)	Аналіз часових рядів індексів для виявлення «точок зламу»	Виявлення моментів деградації чи різкого падіння NDVI	Висока чутливість до довгострокових змін / потреба у стабільних часових рядах

Джерело: розроблено авторами.

На практиці оптимальним є *гібридний підхід*, коли порогові методи застосовуються для швидкого виявлення аномалій, а часовий аналіз та алгоритми машинного навчання уточнюють і класифікують тип змін [3].

Важливо зазначити, що застосування алгоритмів машинного навчання дозволяє підвищити точність і автоматизованість процесів дистанційної ідентифікації деградації земель. Вибір методів залежить від типу даних – просторових, спектральних або часових рядів (табл. 2).

Таблиця 2 – Алгоритми машинного навчання

Алгоритм	Тип даних / завдання	Сильні сторони	Обмеження
Random Forest (RF)	Класифікація багатовимірних спектральних ознак	Інтерпретованість, стійкість до шуму	Менш ефективний на великих часових рядах
XGBoost	Класифікація / регресія, мультиспектральні індекси	Висока точність, оптимізація пам'яті	Складніша модифікація параметрів
SVM	Класифікація деградованих ділянок	Добре працює на невеликих наборах даних	Висока обчислювальна вартість при великих вибірках
CNN (Convolutional Neural Networks)	Обробка зображень (мульти-/гіперспектральні, SAR)	Виявлення просторових патернів, текстур	Вимагає великих датасетів
LSTM / Temporal CNN	Аналіз часових рядів індексів (NDVI, backscatter)	Виявлення довготривалих змін, сезонності	Схильність до перенавчання
Transformer-моделі	Часові ряди великих обсягів даних	Висока здатність до виявлення складних залежностей	Високі обчислювальні витрати

Джерело: розроблено авторами.

Інтеграція класичних алгоритмів (RF, XGBoost, SVM) із сучасними глибинними архітектурами (CNN, LSTM, Transformer) формує багаторівневу систему аналізу, здатну поєднати просторові та часові закономірності. Це відкриває можливість створення комплексної моделі оцінки придатності земель після бойових дій [8].

Побудова моделей класифікації земель за допомогою алгоритмів машинного навчання є лише проміжним етапом; остаточна інтерпретація результатів повинна відбуватися у формі придатності земель до агровикористання, що досягається через систему «прапорів ризику». Такий підхід ґрунтується на багатокритеріальному аналізі, де кожна ділянка отримує статус «придатна», «частково придатна» або «непридатна» відповідно до сукупності діагностичних індикаторів.

Критерії формування прапорів включають:

– ерозійні процеси – визначаються за морфометричними параметрами рельєфу, спектральними та радарними індикаторами зміни поверхні;

– контамінація токсичними речовинами (важкі метали, паливно-мастильні матеріали, продукти вибухів), підтверджена лабораторними аналізами ґрунтів і спектросигнатурами у VNIR / SWIR діапазонах;

– втрата органічної речовини та дегуміфікація – оцінюється за космічними показниками біомаси (NDVI, EVI, NBR) у поєднанні з польовими даними;

– ущільнення ґрунту – виявляється на основі SAR-ознак та даних in-situ (щільність, водопроникність).

Таким чином, алгоритми машинного навчання формують *базову карту стану земель,* після чого застосовується багатокритеріальна логіка, що переводить числові показники у зрозумілу систему категорій ризику [4, с. 112].

На рис. 1 подано концептуальну схему формування прапорів ризику придатності земель. На першому етапі акумулюються вхідні дані різної природи: супутникові мультиспектральні та радарні знімки, результати польових досліджень і метеорологічні показники. Далі ці дані трансформуються в аналітичні індикатори, що характеризують ключові механізми деградації ґрунтів: ерозійні процеси, рівень контамінації, втрату органічної речовини та ступінь ущільнення. На основі нормативних (санітарно-екологічних) та емпіричних порогів формується класифікаційна логіка, яка дозволяє віднести кожну ділянку до одного з трьох класів ризику: придатні (зелений), частково придатні (жовтий) та непридатні (червоний).

Рис. 1. Логіка системи «прапорів ризику»

Джерело: розроблено авторами.

Для забезпечення високої репрезентативності та статистичної надійності даних застосовується *просторово-стратифікований відбір проб,* який дозволяє врахувати гетерогенність агроландшафтів і ступінь деградації в межах бойових зон. Стратифікація території проводиться за ключовими ознаками, такими як тип ґрунту, рельєф, інтенсивність бойових дій та стан рослинного покриву. У межах кожної страти відбір точок здійснюється випадково або за систематичною схемою, що мінімізує вибіркову похибку та забезпечує статистичну представницькість. Розмір вибірки визначається з урахуванням дисперсії основних індикаторів, таких як NDVI, вологість ґрунту та концентрація важких металів, а також з огляду на бажаний рівень довіри та допустиму похибку.

Просторово-стратифікований дизайн вибірок дозволяє зменшити дисперсію оцінок та підвищити чутливість моделей до локальних деградаційних процесів. Отримані польові дані формують референсну основу для калібрування супутникових індикаторів та алгоритмів машинного навчання. Валідація включає кореляційний аналіз між дистанційними показниками, такими як NDVI, SAR backscatter та текстурні ознаки, та польовими вимірюваннями, що характеризують вміст органічної речовини, щільність ґрунту та концентрацію контамінантів. Крім того, проводиться оцінка точності класифікації за допомогою метрик, таких як confusion matrix, Kappa та F1-score, що дозволяє перевірити відповідність прогнозних карт фактичним польовим даним. Для підвищення надійності системи здійснюється чутливісний аналіз порогів системи прапорів ризику, який дозволяє оцінити стабільність класифікаційних рішень при зміні критичних значень індикаторів.

Тож, інтеграція польових вибірок із дистанційними даними забезпечує кількісну перевірку достовірності моделей та формує об’єктивну основу для картування придатності земель і визначення пріоритетів відновлення територій, що зазнали впливу бойових дій [5].

У рамках валідації моделей дистанційної класифікації земель застосовується комплекс кількісних метрик точності, що включає показники загальної точності (accuracy), прецизійності (precision), повноти (recall), F1-score, коефіцієнт узгодженості Каппа (Cohen’s Kappa) та площу під ROC-кривою (ROC-AUC). Для регресійних моделей оцінка здійснюється через стандартні статистичні індикатори похибки: середньоквадратичну (RMSE) та середню абсолютну помилки (MAE), а також коефіцієнт детермінації R^2, що відображає частку пояснюваної дисперсії.

Поряд із цим, критичною є оцінка просторової невизначеності результатів за допомогою карт невизначеності (uncertainty maps), які візуалізують локальні області підвищеної похибки або слабкої надійності прогнозу [9, с. 329].

Після оцінки придатності земель та валідації моделей дистанційного зондування природним продовженням є практична інтерпретація результатів**,** яка дозволяє трансформувати аналітичні висновки у конкретні управлінські та агротехнічні рішення. Карти придатності та прапори ризику можуть слугувати основою для реставрації деградованих ґрунтів**,** планування сівозмін та агротехнічних заходів, спрямованих на відновлення продуктивності земель, а також для страхових розрахунків і механізмів компенсації втрат**,** викликаних бойовими діями. Інтеграція цих даних у геоінформаційні системи (GIS) та системи підтримки прийняття рішень (Decision Support Systems, DSS) надає органам управління можливість оперативного планування, просторового аналізу та пріоритезації зон рекультивації чи обмеженого використання.

Поряд із практичною реалізацією, критичною є оцінка етичних, юридичних та безпекових аспектів роботи з даними. Врахування конфіденційності та ризику публікації точних координат позицій або критичної інфраструктури є обов'язковим, оскільки публікація геопросторових даних у зоні бойових дій може становити безпосередню загрозу безпеці. Доступ до польових та дистанційних даних повинен контролюватися, а будь-які роботи на територіях, уражених бойовими діями, мають бути узгоджені із заходами безпеки, що включають мінімізацію перебування персоналу в небезпечних зонах та використання віддалених методів збору даних, таких як безпілотні літальні апарати або супутниковий моніторинг [2, с. 482].

Таким чином, поєднання наукової оцінки стану земель, практичної реалізації результатів у відновленні та агротехнічному плануванні, а також суворе дотримання етичних і безпекових стандартів забезпечує комплексний підхід до управління територіями, постраждалими від бойових дій.

Висновки. У результаті проведеного дослідження сформовано методологічний каркас дистанційної ідентифікації впливу бойових дій на придатність сільськогосподарських земель, який поєднує супутникові мультиспектральні й радарні дані, алгоритми машинного навчання та систему багатокритеріальних індикаторів. Запропонований підхід дозволяє діагностувати механічні, хімічні та структурні форми деградації ґрунтів, формувати карти придатності з урахуванням ризиків та забезпечувати обґрунтовану основу для управлінських і агротехнічних рішень у повоєнному відновленні. Інтеграція отриманих результатів у геоінформаційні системи та DSS підвищує ефективність планування заходів з реставрації ґрунтів, страхування аграрних ризиків і стратегічного управління територіями.

Подальший розвиток тематики передбачає вдосконалення алгоритмів інтеграції мультиджерельних даних, зокрема гіперспектральних і безпілотних спостережень, а також розробку адаптивних моделей прогнозування довгострокових наслідків воєнної деградації агроландшафтів. Особливої уваги потребує міждисциплінарний аналіз, що поєднає екологічні, агрономічні та соціально-економічні аспекти відновлення земельних ресурсів України.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті.

Під час написання цього матеріалу автори використовували ChatGPT для перевірки англійської граматики в розширеній анотації. Після використання цього інструменту/сервісу автори переглянули та відредагували зміст за потреби і взяли на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Солоха, М. О., Коньшин, Р. В., & Дегтярьов, В. В. (2024). Ідентифікатори впливу воєнних дій на ґрунтовий покрив за супутниковими даними. *Таврійський науковий вісник. Серія: Сільськогосподарські науки*, (137), 235–244. https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.137.29.

2. Bonchkovskyi, O. S., Ostapenko, P. O., Shvaiko, V. M., & Bonchkovskyi, A. S. (2023). Remote sensing as a key tool for assessing war-induced damage to soil cover in Ukraine (the case study of Kyinska territorial hromada). *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, *32*(3), 474–487. https://doi.org/10.15421/112342.

3. Kussul, N., Drozd, S., Yailymova, H., Shelestov, A., Lemoine, G., & Deininger, K. (2023). Assessing damage to agricultural fields from military actions in Ukraine: An integrated approach using statistical indicators and machine learning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *125*, 103562. https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103562.

4. Bulba, I., Drobitko, A., Zadorozhnii, Y., & Pismennyi, O. (2024). Identification and monitoring of agricultural land contaminated by military operations. *Scientific Horizons*, *27*(7), 107–117. https://doi.org/10.48077/scihor7.2024.107.

5. Datsko, O., Zakharchenko, E., Butenko, Y., Melnyk, O., Kovalenko, I., Onychko, V., Ilchenko, V., & Solokha, M. (2024). Ecological assessment of heavy metal content in Ukrainian soils. *Journal of Ecological Engineering*, *25*(11), 100–108. https://doi.org/10.12911/22998993/192669.

6. Tarariko, O., Demyanyuk, O., Ilienko, T., Solokha, M., & Lykhovyd, P. (2025). Satellite information resource – modern potential for solving ecological problems of Ukraine's agrosphere. *Balanced Nature Using*, (1), 55–71. https://doi.org/10.33730/2310-4678.1.2025.328357.

7. Кибальна, І. В., & Гапєєв, С. М. (2023). Визначення підходів до збитків родючості сільськогосподарських угідь внаслідок бойових дій методами дистанційного зондування. *Тиждень студентської науки – 2023: матеріали 78-ої студентської науково-технічної конференції (Дніпро, 24–28 квітня 2023 року)*, 277–279. НТУ «ДП».

8. Daiyoub, A., Gelabert, P., Saura-Mas, S., & Vega-Garcia, C. (2023). War and deforestation: Using remote sensing and machine learning to identify the war-induced deforestation in syria 2010–2019. *Land*, *12*(8), 1509. https://doi.org/10.3390/land12081509.

9. Jorgenson, A. K., Clark, B., & Givens, J. E. (2012). The environmental impacts of militarization in comparative perspective: An overlooked relationship. *Nature and Culture*, *7*(3), 314–337. https://doi.org/10.3167/nc.2012.070304.

10. Saxena, A. (2023). Deteriorating environmental quality with special reference to war and its impact on climate change. *National Academy Science Letters*. https://doi.org/10.1007/s40009-023-01279-y.

References

1. Solokha, M. O., Konshyn, R. V., & Dehtiarov, V. V. (2024). Identyfikatory vplyvu voiennykh dii na gruntovyi pokryv za suputnykovymy danymy [Identifiers of the impact of military actions on soil cover using satellite data]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk. Seriia: Silsko-hospodarski nauky – Tavriya Scientific Bulletin. Series: Agricultural Sciences, 137,* 235–244. https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.137.29.

2. Bonchkovskyi, O. S., Ostapenko, P. O., Shvaiko, V. M., & Bonchkovskyi, A. S. (2023). Remote sensing as a key tool for assessing war-induced damage to soil cover in Ukraine (the case study of Kyinska territorial hromada). *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, *32*, 474–487. https://doi.org/10.15421/112342.

3. Kussul, N., Drozd, S., Yailymova, H., Shelestov, A., Lemoine, G., & Deininger, K. (2023). Assessing damage to agricultural fields from military actions in Ukraine: An integrated approach using statistical indicators and machine learning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *125*, 103562. https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103562.

4. Bulba, I., Drobitko, A., Zadorozhnii, Yu., & Pismennyi, O. (2024). Identification and monitoring of agricultural land contaminated by military operations. *Scientific Horizons*, *27*(7), 107–117. https://doi.org/10.48077/scihor7.2024.107.

5. Datsko, O., Zakharchenko, E., Butenko, Y., & et al. (2024). Ecological assessment of heavy metal content in Ukrainian soils. *Journal of Ecological Engineering*, *25*(11), 100–108. https://doi.org/10.12911/22998993/192669.

6. Tarariko, O., Demyanyuk, O., Ilienko, T., Solokha, M., & Lykhovyd, P. (2025). Suputnykovyi informatsiinyi resurs – suchasnyi potentsial dlia vyrishennia ekolohichnykh problem ahrosfery Ukrainy. [Satellite information resources – modern potential for solving environmental problems in Ukraine's agricultural sector.] *Zbalansovane pryrodokorystuvannia* - Balanced use of natural resources, 2025, 1, 55–71. https://doi.org/10.33730/2310–4678.1.2025.328357.

7. Kybalna, I. V., & Hapieiev, S. M. (2023). Vyznachennia pidkhodiv do zbytkiv rodjuchosti silskohospodarskykh uhid′ vnaslidok boiovykh dii metodamy dystantsiinoho zonduvannia [Determination of approaches to the loss of fertility of agricultural lands due to military actions using remote sensing methods]. *Tyzden' students'koi nauky – 2023: Materialy 78-oi students'koi naukovo-tekhnichnoi konferentsii (Dnipro, 24–28 kvitnia 2023 roku) – Student Science Week – 2023: Proceedings of the 78th Student Scientific and Technical Conference (Dnipro, April 24–28, 2023)*, 277–279. Dnipro: NTU «DP».

8. Daiyoub, A., Gelabert, P., Saura-Mas, S., Vega-Garcia, C. War and Deforestation: Using Remote Sensing and Machine Learning to Identify the War-Induced Deforestation in Syria 2010–2019. *Land,* 2023, 12 (8), 1509. https://doi.org/10.3390/land12081509.

9. Jorgenson, A. K., Clark, B., Givens, J. E. The Environmental Impacts of Militarization in Comparative Perspective: An Overlooked Relationship. *Nat. Cult,* 2012, 7, 314–337. DOI: 10.3167/nc.2012.070304.

10.Saxena, A. Deteriorating Environmental Quality with Special Reference to War and Its Impact on Climate Change. *Natl. Acad. Sci. Lett,* 2024, 47, 447–450. https://doi.org/10.1007/s40009-023-01279-y.

Дата першого надходження статті до видання: 20.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.01.2026

UDC 528.8:631.4:502.3:355.48

Oleksandr Tsvyk[1], Tetiana Malik [2]

[1]PhD Student
Institute of Geology Taras Shevchenko National University of Kyiv (Kyiv, Ukraine)
E-mail: tsvik1603@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0006-5464-2078

[2]PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Geoinformatics Institute of Geology
Taras Shevchenko National University of Kyiv (Kyiv, Ukraine)
E-mail: malik.tat@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-1362-8433. **ResearcherID**: V-5877-2018

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR REMOTE IDENTIFICATION OF THE IMPACT OF MILITARY ACTIONS ON AGRICULTURAL LAND SUITABILITY

The article presents a comprehensive methodology for remote identification of the impact of military actions on the suitability of land for agricultural use, based on the integration of multispectral and radar satellite data, field observations, and machine learning tools. The key mechanisms of soil degradation induced by military factors are substantiated, including erosion processes, contamination by toxic substances, loss of organic matter, mechanical destruction, and compaction. It is shown that effective monitoring requires the use of spectral indices (NDVI, EVI, NBR), SAR indicators, texture variability characteristics, and multi-year temporal trends, which form the basis of a system of diagnostic indicators. An algorithmic approach for detecting changes in land condition is proposed, combining threshold methods, time series analysis, and machine learning-based classification and regression methods (Random Forest, CNN, LSTM, Transformer). Special attention is paid to modeling nonlinear relationships between degradation indicators and land suitability levels.

Within the study, a "risk flag" classification system was developed to differentiate territories according to suitability categories – suitable, partially suitable, and unsuitable for agricultural production. Approaches for model validation are presented, including performance assessment using metrics such as accuracy, F1-score, Kappa, and ROC-AUC, as well as spatial uncertainty analysis, allowing the identification of areas with the highest methodological vulnerability. The importance of comprehensive mapping of results in a GIS environment and subsequent integration into decision support systems (DSS) is emphasized.

The practical significance of the developed methodology lies in its applicability for planning land restoration after military actions, assessing risks for agricultural production, improving agrotechnical measures, insurance analysis, and forming state policy on the return of damaged territories to productive use. Particular emphasis is placed on ethical, legal, and security aspects of working with data in conflict zones, which defines the framework for the responsible use of research results in post-conflict recovery contexts.

Keywords: *remote sensing; soil degradation; military actions; land suitability; machine learning; agrosystems.*
Fig.: 1 Table: 2. References: 10.

Цвик О. В., Малік Т. М. Розробка методики дистанційної ідентифікації впливу бойових дій на придатність сільськогосподарських угідь. *Технічні науки та технології*, 2026. № 1(43). С. 447-456. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-447-456.

ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ НАУКОВИХ СТАТЕЙ ДО НАУКОВОГО ЖУРНАЛУ «ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ»

Шановні дописувачі!

Для подання статті необхідно спочатку надіслати статтю та інформацію про автора, з яким контактувати щодо публікації статті, оформлені за встановленими вимогами, для попереднього розгляду редакційною колегією журналу «Технічні науки та технології». За умови відповідності статті спеціальностям, за якими акредитовано журнал, відповідності нормам академічної доброчесності за результатами перевірки на плагіат, позитивної незалежної рецензії від призначеного редакційною колегією рецензента, стаття розміщується в макеті журналу.

Редакційна колегія забезпечує розгляд та незалежне рецензування поданих до публікації матеріалів вченими, які мають науковий ступінь та здійснюють дослідження за спеціальністю, що відповідає тематиці поданого для публікації матеріалу, і є авторами (співавторами) загальною кількістю не менше трьох публікацій у наукових виданнях, включених до категорії «А» та/або категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України, та/або у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus за відповідною спеціальністю, оприлюднених упродовж останніх п’яти років.

Опублікування наукових статей у журналі «Технічні науки та технології» є платним. Вартість публікації наукової статті становить:

- **80 грн/1 сторінка** (за умови, якщо авторам потрібна паперова версія журналу);
- **60 грн/1 сторінка** (за умови, якщо авторам достатньо електронної версії журналу).

Остаточна вартість публікації формується після готовності електронного макету журналу та повідомляється автору, відповідальному за публікацію статті. Оплата підтверджується квитанцією.

УМОВИ ПУБЛІКАЦІЇ, ВИМОГИ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ, РЕКВІЗИТИ ОПЛАТИ ТА ОСТАННІ НОМЕРИ НАУКОВОГО ЖУРНАЛУ «ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ» РОЗМІЩЕНО НА САЙТІ»: **http://tst.stu.cn.ua/**

Контактна інформація:
Мороз Наталія Вікторівна
Тел.: (0462) 665-225
E-mail: tst.technical.sj@gmail.com

Відповідальність за матеріали, наведені у статті, несе автор.
Неправильно оформлені автором стаття та супровідні документи, що не відповідають зазначеним вимогам, розглядатися не будуть.

Редакція розглядає надходження публікації та супровідних документів як згоду дописувача (ів) щодо передачі авторського права на використання твору (тиражування, розповсюдження тощо).

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

№ 1(43)

Технічний редактор, відповідальна за випуск Н. В. Мороз
Комп’ютерна верстка О. П. Журко

Заснований у 2015 році. Ідентифікатор медіа
відповідно до Реєстру суб’єктів у сфері медіа від 31.08.2023 р. № 782 R30-01210

Підписано до друку 27.01.2026. Формат 60×84/8. Ум. друк. арк. – 53,24.
Тираж 100 пр. Замовлення № 05/26.

Редакційно-видавничий відділ
Національного університету «Чернігівська політехніка»
14030, Україна, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95.
Свідоцтво про внесення суб’єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції серія ДК № 7128 від 18.08.2020 р.