

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Журнал заснований у 1918 році

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Серія: Технічні науки

Том 37 (76) № 3 2026

Частина 1



Видавничий дім
«Гельветика»
2026

Головний редактор:

Кисельов Володимир Борисович, доктор технічних наук, професор, директор навчально-наукового інституту муніципального управління та міського господарства, Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського, Україна

Члени редакційної колегії:

Бронін Сергій Вадимович, кандидат технічних наук, доцент кафедри кібербезпеки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний університет», Україна;

Гуйда Олександр Григорович, кандидат наук з державного управління, професор, завідувач кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій, Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського, Україна;

Лисенко Олександр Іванович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри телекомунікацій Навчально-наукового інституту телекомунікаційних систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна;

Лісовець Сергій Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерних систем та технологій Навчально-наукового інституту муніципального управління та міського господарства, Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського, Україна;

Медведєв Микола Георгійович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерних систем та технологій, Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського, Україна;

Олещенко Любов Михайлівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна;

Скуратовський Руслан Вячеславович, кандидат технічних наук, доцент, докторант, Інститут математики НАН України, Україна;

Alexandr Neftissov, PhD, Associate Professor, Vice-Rector for Science and Innovation, Kazakh National University of Sports, Kazakhstan;

Andreas Pester, Dr.phil.habil., Professor, Professor at the Faculty of Informatics and Computer Science, British University of Egypt, Egypt;

Danielienė Renata, Dr., Associate Professor, Associate Professor of the Institute of Social Sciences and Applied Information, Vilnius University, Lithuania.

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою програмного забезпечення StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl.

**Рекомендовано до друку та поширення через мережу Internet
Вченою радою Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського
(протокол № 11 від 5 травня 2026 року).**

Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки»
zareєстровано відповідно до Рішення Національної ради України
з питань телебачення і радіомовлення № 1136 від 11.04.2024 року.

Ідентифікатор медіа: R30-04000.

Суб'єкт у сфері друкованих медіа – Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського
(просп. Берестейський, 10, м. Київ, 01135, e-mail: crimea.tnu@gmail.com, тел.: +38 (044) 529-05-16).

Мови видання: українська, англійська, польська, німецька,
французька, словацька, румунська, італійська.

Періодичність: 6 разів на рік.

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б») з технічних наук
(спеціальності: G1 Хімічні технології та інженерія; G4 Енерговиробництво (за спеціалізацією); G5 Електроніка,
електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка) відповідно до Наказу МОН України
від 17.03.2020 № 409 (додаток 1), F2 Інженерія програмного забезпечення; F6 Інформаційні системи і технології;

F7 Комп'ютерна інженерія; G7 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка;
D3 Менеджмент; G11 Машинобудування (за спеціалізаціями); J5 Морський та внутрішній водний транспорт;
J6 Авіаційний транспорт; J7 Залізничний транспорт; J8 Автомобільний транспорт
відповідно до Наказу МОН України від 02.07.2020 № 886 (додаток 4)

Журнал включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus International
(Республіка Польща)

Сторінка журналу: www.tech.vernadskyjournals.in.ua

ISSN 2663-5941 (Print)

ISSN 2663-595X (Online)

© Таврійський національний університет ім. В.І. Вернадського, 2026

ЗМІСТ

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

Абакумов Р.В.

АВТОМАТИЗОВАНЕ ВИЯВЛЕННЯ АРХІТЕКТУРНИХ ПОРУШЕНЬ У JAVA-ПРОЄКТАХ
ЗАСОБАМИ СТАТИЧНОГО АНАЛІЗУ.....1

Bondarenko V.S., Barkovska O.Yu., Trunov V.O., Havrashenko A.O.

A METHOD FOR DATASET AUGMENTATION IN IMAGE SEGMENTATION TASKS BASED
ON IMAGE SYNTHESIS..... 9

Боряк К.Ф., Ігнатенко О.А.

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ОПЕРАТИВНОГО ОЦІНЮВАННЯ ПОТОЧНОГО
ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СУДНОВИХ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ 18

Варганова Д.О., Коломієць Р.О., Окунькова О.О.

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ АДАПТИВНІ СИСТЕМИ НАВЧАННЯ У ПІДГОТОВЦІ
МАЙБУТНІХ ІТ-ФАХІВЦІВ.....31

Волков Д.В., Любченко В.В.

ФОРМАЛЬНА МОДЕЛЬ ЗАГРОЗ БЕЗПЕКИ МІКРОСЕРВІСНИХ ЗАСТОСУНКІВ
НА ОСНОВІ ЛОГІКИ ПЕРШОГО ПОРЯДКУ..... 37

Газдюк К.П., Срібний О.І.

АРХІТЕКТУРА МУЛЬТИАГЕНТНОЇ СИСТЕМИ МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ
ІНФЕКЦІЙНИХ ЗАХВОРЮВАНЬ НА ОСНОВІ JAVA-SERVICE..... 44

Головенець М.І., Колісник М.М.

МЕТОД КОРЕЛЯЦІЇ ПОДІЙ ЖУРНАЛІВ ВЕБСЕРВЕРІВ І WAF ДЛЯ ПОПЕРЕДЖЕННЯ
КІБЕРІНЦИДЕНТІВ У ВЕБЗАСТОСУНКАХ..... 50

Горба Д.О., Терейковський І.А.

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ У ВІДЕОПОТОЦІ
НА МОБІЛЬНИХ ПЛАТФОРМАХ.....55

Goyushova U.M.

STRUCTURAL VISION-BASED UAV NAVIGATION USING HESS MATRIX
AND B-SPLINE MODELING.....61

Єрошенко О.А., Федорченко В.М., Партика С.О., Пивоварова Д.І.

МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ DDOS-АТАК НА КОНТРОЛЕР SDN НА ОСНОВІ ІНФОРМАЦІЙНОЇ
ЕНТРОПІЇ ВИЩОГО ПОРЯДКУ.....67

Здольник М.О., Степанець О.В.

ЦІЛЬОВІ ФУНКЦІЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ЛОКАЛЬНИМИ ОБ'ЄКТАМИ
ТЕПЛОСПОЖИВАННЯ В МУЛЬТИАГЕНТНИХ СИСТЕМАХ.....78

Кандиба І.О.

ЗАСТОСУВАННЯ ОНТОЛОГІЙ ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ СЦЕНАРІЇВ ВСТУПНОЇ КАМПАНІЇ
ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ.....87

Кобець В.М., Белей О.І.

ПРОЄКТУВАННЯ НИЖНЬОГО РІВНЯ АВТОМАТИЗОВАНО-ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ
УРОЖАЙНОСТІ ЛІСОВИХ МАСИВІВ..... 93

Корнієнко Б.Я., Ладієва Л.Р., Корнієнко Я.М., Нестерук А.О., Савіна О.О.

СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ВИРОБНИЦТВОМ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ У ГРАНУЛЯТОРІ
ІЗ ПСЕВДОЗРІДЖЕНИМ ШАРОМ ІЗ НЕЧІТКИМ РЕГУЛЯТОРОМ.....98

Короткіх В.М.

КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ПОШУКОВОЇ СИСТЕМИ В СИСТЕМАХ
АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЄКТУВАННЯ.....107

Кривуля Г.Ф., Зигін С.Є.

ВИЯВЛЕННЯ КЕРУЮЧИХ СИГНАЛІВ ПРИ КЕРУВАННІ БЕЗПІЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ
СИСТЕМАМИ В УМОВАХ НАЯВНОСТІ ІНТЕНСИВНИХ ЗАВАД.....114

Кухта О.П., Пірко І.Б. МЕТОД КОВЗНОГО ГОРИЗОНТУ ТА КОРИДОРНОГО ОБМЕЖЕННЯ В ІЄРАРХІЧНИХ СЕРЕДОВИЩАХ З ДИНАМІЧНИМИ ПЕРЕШКОДАМИ.....	120
Лисенко О.І., Тачиніна О.М., Чумаченко С.М., Кисельов В.Б., Гуйда О.Г., Омецинська Н.В. КАСКАДНА SISO LTI СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ВУЗЛА РУХОМОСТІ ВІЙСЬКОВОГО ГУМАНОЇДНОГО РОБОТА.....	125
Луфференко С.Л., Щербина І.С. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ІНДИВІДУАЛЬНОЇ ОСВІТНЬОЇ ТРАЄКТОРІЇ ЯК ЗАДАЧА ОПТИМІЗАЦІЇ.....	134
Люшенко А.М. МОДЕЛІ ПРОЕКТУВАННЯ ТА СИНХРОНІЗАЦІЇ ДАНИХ ДЛЯ ОФЛАЙН-ПЕРШОЧЕРГОВИХ МАСШТАБОВАНИХ МОБІЛЬНИХ ЗАСТОСУНКІВ.....	140
Марченко О.І. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КІБЕРБЕЗПЕКИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ ЗРОСТАННЯ КІБЕРЗАГРОЗ ЦИФРОВОГО СЕРЕДОВИЩА.....	148
Медведєв Д.Г., Хоцькіна В.Б., Лисункін Д.Д. ДЕТЕКЦІЯ ФЕЙКОВИХ НОВИН З ВИКОРИСТАННЯМ NLP ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ЇЇ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	156
Миронюк Ф.Ю., Беглов К.В., Зима І.В. КЕРУВАННЯ РОЗПОДІЛОМ ПОТУЖНОСТІ В ГІБРИДНІЙ ЕНЕРГЕТИЧНІЙ УСТАНОВЦІ ІЗ СОНЯЧНОЮ, ВІТРОВОЮ ТА АКУМУЛЯТОРНОЮ ПІДСИСТЕМАМИ.....	162
Нікітін В.С., Гіоргізова-Гай В.Ш. ПІДХІД ДО ГЕНЕРАЦІЇ ШАБЛОНІВ ДОКУМЕНТІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ LLM АГЕНТІВ.....	170
Олексій А.О., Дичка І.А., Олещенко Л.М., Хіцко Я.В., Сущук-Слюсаренко В.І. ОГЛЯД МОЖЛИВИХ УДОСКОНАЛЕНЬ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО МЕТОДУ UWAR-GAN ТА НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЇ АРХІТЕКТУРИ U-NET ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИДУШЕННЯ ФОНОВИХ ШУМІВ.....	178
Онай М.В., Згуровський Я.Ю. ПРОЄКТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ ТА ФОРМУЛЮВАННЯ ВИМОГ ДО ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ ОЦІНЮВАННЯ ПОСТКВАНТОВИХ КРИПТОГРАФІЧНИХ АЛГОРИТМІВ.....	187
Palonyi A.S., Nechypurenko A.G. OPTIMIZATION OF AUTOMATED STRESS MANAGEMENT STRATEGIES FOR AIR TRAFFIC CONTROLLERS USING REINFORCEMENT LEARNING METHOD.....	194
Парфененко Ю.В., Кузнєцов Е.Г. АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ТА ПРОЄКТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ ОБРОБКИ ВЕЛИКИХ ДАНИХ ДЛЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ ЕНЕРГЕТИЧНИХ МІКРОМЕРЕЖ.....	202
Пилипенко А.Г. МУЛЬТИАГЕНТНІ МЕТОДИ ВИЯВЛЕННЯ КОРЕЛЯЦІЙНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ У РІЗНОРІДНИХ ДАНИХ.....	208
Пирог М.В., Терешук Г.М. ВАЛІДНІСТЬ ТЕСТОВОГО ОЦІНЮВАННЯ ЗНАНЬ СТУДЕНТІВ В ЕПОХУ ГЕНЕРАТИВНОГО ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ: СИСТЕМАТИЧНИЙ ОГЛЯД.....	215
Півторак Д.О., Лакоза С.Л., Скорик Є.В. ПРОЄКТУВАННЯ ТА ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ВОДИ.....	223
Превисокова Н.В., Семаньків М.В., Ізмайлов А.В. МОДЕЛЬ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРО ОЦІНКУ ЖИТЛОВОЇ НЕРУХОМОСТІ НА ОСНОВІ ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ АНАЛІЗУ ДАНИХ І ПРОГНОЗУВАННЯ.....	231
Пучков В.О. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОГНОСТИЧНИХ AR-СИСТЕМ НА ОСНОВІ МУЛЬТИМОДАЛЬНОГО АНАЛІЗУ.....	239
Романенко О.О. Q-АНАЛІЗ СИСТЕМИ ПРОГНОЗНОГО ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ.....	245

Рудь А.В., Рудь А.В. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ АГРОМАШИНИ В СИСТЕМАХ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА: АВТОМАТИЗАЦІЯ, СЕНСОРНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ОПЕРАЦІЙ	250
Syromiatnikov M.V. A CONTEXT-EFFICIENT EVIDENCE-BASED TECHNOLOGY FOR AUTOMATED REPOSITORY- LEVEL SOFTWARE QUALITY EVALUATION USING LARGE LANGUAGE MODELS.....	257
Ткачов В.М., Рубан І.В. РОЗРОБКА МЕТОДУ АНАЛІЗУ ЖИВУЧОСТІ СЕРВІСІВ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ НА МОБІЛЬНІЙ ПЛАТФОРМІ ЗА РЕСУРСНО-ЧАСОВИМИ ЗМІННИМИ.....	266
Філіппова М.В., Богдан Г.А., Демченко М.О. КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ЕКСТРУЗІЇ ЕЛЕКТРИЧНОГО КАБЕЛЮ.....	276
Фуртат С.О., Фуртат О.В., Лялікова Ю.В. ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ОБРОБКИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ АВІАПЕРЕВЕЗЕНЬ.....	282
Shevchenko V.V., Polushko M.M. AUTOMATED SYSTEM FOR DIAGNOSTICS OF THE PARTS PROCESSING	286
Штіфзон О.Й., Юдін О.С. СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ МІКРОКЛІМАТОМ СКЛАДСЬКИХ ПРИМІЩЕНЬ ДЕРЕВООБРОБНОГО ПІДПРИЄМСТВА З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ.....	292
Юрченко В.А., Єрємїна Н.С., Близниченко О.М. АРХІТЕКТУРА БЛОКЧЕЙНУ ТА ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ У СУЧАСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ.....	301
Якименко М.С., Босько В.В., Бокій А.Р., Лисенко І.А., Мелешко Є.В. МЕТОДИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ В MESH-МЕРЕЖАХ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ.....	308
Ярошук Л.Д., Савченко Т.В. ЕКСПЕРТНІ МЕТОДИ ПІДТРИМКИ РІШЕНЬ В ЗАДАЧАХ РЕСУРСОЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЦТВА ФОСФОРНОЇ КИСЛОТИ.....	313
ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....	321

CONTENTS

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND AUTOMATION

Abakumov R.V.

AUTOMATED DETECTION OF ARCHITECTURAL VIOLATIONS
IN JAVA PROJECTS USING STATIC ANALYSIS.....1

Bondarenko V.S., Barkovska O.Yu., Trunov V.O., Havrashenko A.O.

A METHOD FOR DATASET AUGMENTATION IN IMAGE SEGMENTATION TASKS BASED
ON IMAGE SYNTHESIS..... 9

Boriak K.F., Ihnatenko O.A.

AUTOMATION OF THE PROCESS OF OPERATIVE ASSESSMENT OF THE CURRENT
TECHNICAL CONDITION OF MARINE DIESEL ENGINES.....18

Varhanova D.O., Kolomiiets R.O., Okunkova O.O.

INTELLIGENT ADAPTIVE LEARNING SYSTEMS IN THE TRAINING
OF FUTURE IT SPECIALISTS.....31

Volkov D.V., Liubchenko V.V.

FORMAL MODEL OF SECURITY THREATS TO MICROSERVICE APPLICATIONS BASED
ON FIRST-ORDER LOGIC..... 37

Hazdiuk K.P., Sribnyi O.I.

ARCHITECTURE OF A MULTI-AGENT SYSTEM FOR MODELLING THE SPREAD
OF INFECTIOUS DISEASES BASED ON A JAVA SERVICE.....44

Holovenets M.I., Kolisnyk M.M.

METHOD OF CORRELATING WEB SERVER AND WAF LOG EVENTS FOR PREVENTION
OF CYBER INCIDENTS IN WEB APPLICATIONS.....50

Horba D.O., Tereikovskiy I.A.

ANALYSIS OF OBJECT DETECTION TECHNOLOG IN VIDEO STREAMS
ON MOBILE PLATFORMS..... 55

Goyushova U.M.

STRUCTURAL VISION-BASED UAV NAVIGATION USING HESS MATRIX
AND B-SPLINE MODELING.....61

Yeroshenko O.A., Fedorchenko V.M., Partyka S.O., Pyvovarova D.I.

HIGHER-ORDER INFORMATION ENTROPY-BASED DDOS ATTACK DETECTION
METHOD FOR SDN CONTROLLER.....67

Zdolnyk M.O., Stepanets O.V.

TARGET FUNCTIONS FOR INTELLIGENT CONTROL OF LOCAL HEAT CONSUMPTION
FACILITIES IN MULTI-AGENT SYSTEMS.....78

Kandyba I.O.

SCENARIO GENERATION FOR UNIVERSITY ADMISSION CAMPAIGNS USING ONTOLOGIES.....87

Kobets V.M., Belei O.I.

DESIGN OF A LOWER LEVEL AUTOMATED INFORMATION SYSTEM FOR FOREST YIELD.....93

Korniienko B.Ya., Ladieva L.R., Kornienko Ya.M., Nesteruk A.O., Savina O.O.

CONTROL SYSTEM FOR THE PRODUCTION OF MINERAL FERTILIZERS
IN A FLUIDIZED BED GRANULATOR WITH A FUZZY CONTROLLER.....98

Korotkykh V.M.

CONCEPTUAL MODEL OF A SEARCH SYSTEM IN COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEMS.....107

Krivoulya G.F., Zygin S.E.

DETECTION OF CONTROL SIGNALS IN UNMANNED AERIAL SYSTEMS UNDER
INTENSE INTERFERENCE CONDITIONS.....114

Kukhta O.P., Pirko I.B.

ROLLING HORIZON AND CORRIDOR CONSTRAINING METHOD IN HIERARCHICAL
ENVIRONMENTS WITH DYNAMIC OBSTACLES.....120

Lysenko O.I., Tachynina O.M., Chumachenko S.M., Kyselov V.B., Guida O.H., Ometsynska N.V.

CASCADE SISO LTI AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF THE ELECTRIC DRIVE
OF A MOBILITY UNIT OF A MILITARY HUMANOID ROBOT.....125

Luferenko S.L., Shcherbyna I.S. MATHEMATICAL MODEL OF INDIVIDUAL EDUCATIONAL TRAJECTOR AS AN OPTIMIZATION PROBLEM.....	134
Liushenko A.M. DESIGN AND DATA SYNCHRONIZATION MODELS FOR OFFLINE-FIRST SCALABLE MOBILE APPLICATIONS.....	140
Marchenko O.I. ENSURING CYBERSECURITY OF INFORMATION SYSTEMS UNDER THE CONDITIONS OF INCREASING CYBER THREATS IN THE DIGITAL ENVIRONMENT.....	148
Medvediev D.H., Khotskina V.B., Lysunkin D.D. FAKE NEWS DETECTION USING NLP AND VISUALIZATION OF ITS RESULTS.....	156
Myroniuk F.Yu., Beglov K.V., Zyma I.V. POWER DISTRIBUTION CONTROL IN A HYBRID ENERGY SYSTEM WITH SOLAR, WIND, AND BATTERY SUBSYSTEMS.....	162
Nikitin V.S., Hiorhizova-Hai V.S. AN APPROACH TO DOCUMENT TEMPLATE GENERATION USING LLM AGENTS.....	170
Oleksii A.O., Dychka I.A., Oleshchenko L.M., Khitsko Ia.V., Suschuk-Sliusarenko V.I. REVIEW OF POTENTIAL IMPROVEMENTS TO THE UWAR-GAN NEURAL NETWORK METHOD AND THE U-NET NEURAL NETWORK ARCHITECTURE TO ENHANCE BACKGROUND NOISE SUPPRESSION	178
Onai M.V., Zghurovskyi Ya.Yu. ARCHITECTURE DESIGN AND REQUIREMENTS SPECIFICATION OF A SOFTWARE SYSTEM FOR POST-QUANTUM CRYPTOGRAPHIC ALGORITHM EVALUATION.....	187
Palonyi A.S., Nechypurenko A.G. OPTIMIZATION OF AUTOMATED STRESS MANAGEMENT STRATEGIES FOR AIR TRAFFIC CONTROLLERS USING REINFORCEMENT LEARNING METHOD.....	194
Parfenenko Yu.V., Kuznetsov E.G. ANALYSIS OF APPROACHES AND DESIGN OF BIG DATA PROCESSING ARCHITECTURE FOR DIGITAL TWINS OF ENERGY MICROGRIDS.....	202
Pylypenko A.H. MULTI-AGENT METHODS FOR DETECTING CORRELATION DEPENDENCIES IN HETEROGENEOUS DATA.....	208
Pyroh M.V., Tereshchuk H.M. THE VALIDITY OF TEST-BASED ASSESSMENT OF STUDENT KNOWLEDGE IN THE AGE OF GENERATIVE ARTIFICIAL INTELLIGENCE: A SYSTEMATIC REVIEW.....	215
Pivtorak D.O., Lakoza S.L., Skoryk Ye.V. DESIGN AND PHYSICAL MODELING OF THE IMPROVING WATER QUALITY AUTOMATED SYSTEM.....	223
Prevysokova N.V., Semankiv M.V., Izmailov A.V. DECISION-MAKING MODEL FOR RESIDENTIAL HOUSE PRICE BASED ON A SOFTWARE SYSTEM FOR DATA ANALYSIS AND PRICE PREDICTION.....	231
Puchkov V.O. PROBLEM STATEMENT OF RESEARCH ON PREDICTIVE AR SYSTEMS BASED ON MULTIMODAL ANALYSIS.....	239
Romanenko O.O. Q-ANALYSIS OF A PREDICTIVE MAINTENANCE SYSTEM.....	245
Rud A.V., Rud A.V. INTELLIGENT AGRICULTURAL MACHINES IN PRECISION FARMING SYSTEMS: AUTOMATION, SENSOR TECHNOLOGIES AND OPTIMIZATION OF OPERATIONS	250
Syromiatnikov M.V. A CONTEXT-EFFICIENT EVIDENCE-BASED TECHNOLOGY FOR AUTOMATED REPOSITORY- LEVEL SOFTWARE QUALITY EVALUATION USING LARGE LANGUAGE MODELS.....	257

Tkachov V.M., Ruban I.V.	
DEVELOPMENT OF A METHOD FOR ANALYZING THE SURVIVABILITY OF INFORMATION SYSTEM SERVICES ON A MOBILE PLATFORM BASED ON RESOURCE-TIME VARIABLES.....	266
Filippova M.V., Bohdan H.A., Demchenko M.O.	
CONTROL OF THE ELECTRICAL CABLE EXTRUSION PROCESS.....	276
Furtat S.O., Furtat O.V., Lialikova Yu.V.	
PROMISING DIRECTIONS FOR AUTOMATING THE PROCESSING OF AIR TRANSPORTATION OPERATIONAL PARAMETERS.....	282
Shevchenko V.V., Polushko M.M.	
AUTOMATED SYSTEM FOR DIAGNOSTICS OF THE PARTS PROCESSING	286
Shtifzon O.Y., Yudin O.S.	
MICROCLIMATE CONTROL SYSTEM USING FUZZY LOGIC FOR STORAGE FACILITIES AT A WOODWORKING ENTERPRISE.....	292
Yurchenko V.A., Yeromina N.S., Blyznychenko O.M.	
BLOCKCHAIN ARCHITECTURE AND ITS APPLICATION IN MODERN INFORMATION SYSTEMS.....	301
Yakymenko M.S., Bosko V.V., Bokiyy A.R., Lysenko I.A., Meleshko Ye.V.	
METHODS OF ENERGY-EFFICIENT ROUTING IN MESH NETWORKS OF THE INTERNET OF THINGS.....	308
Yaroshchuk L.D., Savchenko T.V.	
EXPERT DECISION SUPPORT METHODS IN RESOURCE EFFICIENCY TASKS OF PHOSPHORIC ACID PRODUCTION.....	313
INFORMATION ABOUT AUTHORS.....	321

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 004.41

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.1/01>**Абакумов Р.В.**<https://orcid.org/0009-0004-2743-3815>

Dispatch Health Management, USA

АВТОМАТИЗОВАНЕ ВИЯВЛЕННЯ АРХІТЕКТУРНИХ ПОРУШЕНЬ У JAVA-ПРОЄКТАХ ЗАСОБАМИ СТАТИЧНОГО АНАЛІЗУ

Актуальність дослідження зумовлена ускладненням сучасних програмних систем (далі – ПС), зростанням обсягів коду та тривалим життєвим циклом продуктів, що значно ускладнює забезпечення архітектурної узгодженості програмного забезпечення (далі – ПЗ). У масштабних Java-проєктах розвиток системи часто супроводжується порушеннями архітектурних правил: з'являються небажані залежності між модулями, циклічні зв'язки та деградація шарової структури. Це спричиняє накопичення технічного боргу, ускладнює супровід та ускладнює супровід ПЗ. За таких умов важливим є використання засобів статичного аналізу, які уможливають автоматизацію контролю архітектурних обмежень і своєчасне виявлення структурні відхилення. Метою статті є підвищення архітектурної узгодженості ПС шляхом використання засобів статичного аналізу коду для автоматизованого виявлення архітектурних порушень у Java-проєктах. У дослідженні застосовано методи системного аналізу архітектури ПС, порівняльний аналіз сучасних інструментів статичного аналізу коду, а також узагальнення практик їхнього застосування в процесі розроблення ПЗ. Досліджено особливості контролю архітектурних залежностей у Java-проєктах та можливості застосування таких інструментів, як SonarQube, ArchUnit, Structure101 та jQAssistant для автоматизованого виявлення порушень архітектурних правил. Проаналізовано сучасні підходи до забезпечення архітектурної цілісності ПС. Встановлено, що основними причинами архітектурної деградації є порушення правил залежностей між модулями, виникнення циклічних зв'язків та надмірна зв'язаність компонентів системи. Доведено, що застосування інструментів статичного аналізу дає змогу автоматично контролювати структуру коду, своєчасно виявляти архітектурні порушення та підтримувати модульність систем. Порівняльний аналіз інструментів підтвердив, що їхня інтеграція в процеси CI/CD дає змогу ефективно контролювати архітектурні обмеження під час розроблення. У висновках зазначено, що застосування інструментів статичного аналізу є ефективним механізмом автоматизованого контролю архітектурної структури ПС. Доведено, що інтеграція таких засобів у процеси розроблення ПЗ дає змогу своєчасно виявляти структурні відхилення, зменшувати технічний борг та підтримувати стабільну еволюцію архітектури Java-проєктів. Перспективи подальших досліджень пов'язані з удосконаленням методів автоматизованого аналізу архітектури програмного продукту та застосуванням інтелектуальних алгоритмів для прогнозування архітектурних порушень.

Ключові слова: структура програмного коду, залежності між модулями, технічний борг, контроль архітектури, програмна інженерія, якість програмного забезпечення.

Постановка проблеми. Сучасні ПС характеризуються високою складністю, значним обсягом коду та тривалою еволюцією програмних продуктів, що висуває підвищені вимоги до архітектурної узгодженості ПЗ. Архітектура ПС визначає структуру взаємодії її компонентів, регламентує

залежності між модулями й забезпечує підтримувальність, масштабованість і надійність програмного продукту. Проте в процесі розвитку програмних проєктів, особливо у великих Java-системах із колективним розробленням, нерідко виникають відхилення від початково визначених архітектур-

них принципів. Такі порушення проявляються як небажані залежності між пакетами й класами, порушення шарової структури або формування циклічних зв'язків, що поступово ускладнює супровід системи й призводить до накопичення технічного боргу.

Виявлення таких архітектурних відхилень традиційними методами контролю якості ПЗ є складним, оскільки вони не пов'язані безпосередньо з функціональними помилками, а стосуються структурної організації коду. У цих умовах особливого значення набуває застосування статичного аналізу, що дає змогу аналізувати структуру ПС без виконання коду та автоматично перевіряти відповідність реалізації заданим архітектурним правилам. З огляду на це, розроблення та застосування підходів до автоматизованого виявлення архітектурних порушень у Java-проєктах є важливим науково-практичним завданням, спрямованим на підвищення якості ПЗ та ефективності його розроблення й супроводу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Огляд сучасних досліджень дає змогу виокремити кілька груп наукових підходів, які формують методологічну основу дослідження. Значну частину робіт присвячено виявленню архітектурних антипатернів і структурних відхилень, які ідентифікуються за допомогою аналізу вихідного коду ПС. Зокрема, К. Трубіані та співавтори (C. Trubiani et al.) розглядають підхід до автоматизованого виявлення антипатернів продуктивності в Java-застосунках, що уможливило визначення неефективних архітектурних рішень та потенційних структурних дефектів ПС [1]. Можливості автоматизованого виявлення та візуалізації архітектурних порушень у середовищах безперервної інтеграції аналізують С. Мендоса та колеги (C. Mendoza et al.), що сприяє забезпеченню раннього контролю відповідності коду встановленим архітектурним обмеженням [2]. Ефективність інструментів статичного аналізу у виявленні порушень, які традиційно ідентифікуються під час ручного перегляду коду досліджують С. Мехрпур (S. Mehrouf) та Т. Д. ЛаТо́за (T. D. LaToza). Це підтверджує доцільність автоматизації контролю архітектурної дисципліни ПС [3]. Комплексне оцінювання інструментів статичного аналізу для пошуку вразливостей у Java-кодi здійснюють М. Алкарадагі (M. Alqaradaghi) та Т. Козшик (T. Kozsik), демонструючи їхній потенціал для виявлення структурних і логічних дефектів ПЗ [4]. Автоматизований підхід до виявлення патернів проєктування в програмних проєктах пропо-

нують К. К. Гупта та співавтори (K. K. Gupta et al.), що можна застосовувати для аналізу відповідності програмного коду типовим архітектурним рішенням і виявлення відхилень від них [5].

Інша група досліджень зосереджена на застосуванні статичного аналізу для виявлення вразливостей ПЗ та неправильного використання програмних бібліотек, що часто є наслідком порушення архітектурних принципів побудови ПС. Застосування software composition analysis для виявлення вразливостей у Java-проєктах шляхом аналізу залежностей сторонніх компонентів ПЗ досліджує колектив авторів на чолі з Л. Чжао (L. Zhao et al.) [6]. Проблему автоматичного виявлення неправильного використання криптографічних програмних інтерфейсів застосунків (application programming interface, API) у Java-програмах аналізують Ю. Чжан та співавтори (Y. Zhang et al.), демонструючи можливості статичного аналізу для контролю безпечного використання програмних бібліотек [7]. Емпіричне оцінювання інструментів статичного аналізу для виявлення дефектів коду на основі тестових наборів Juliet Test Suites, що підтверджує їхню ефективність у процесі автоматизованого аналізу ПЗ, здійснюють Р. Аманква та колеги (R. Amankwah et al.) [8]. Взаємозв'язок між архітектурними smells та попередженнями інструментів статичного аналізу досліджує колектив науковців під керівництвом М. Еспозіто (M. Esposito et al.). Автори доводять, що сигнали таких інструментів є індикаторами глибших архітектурних проблем ПС [9].

Окремий пласт досліджень присвячений розробленню методів автоматизованого виявлення та усунення дефектів коду на основі практично-орієнтованого аналізу та інтелектуальних алгоритмів. Новий підхід до автоматичного виявлення та виправлення вразливостей у Java-кодi на основі прикладноорієнтованих програмних прикладів пропонують Ю. Чжан та співавтори (Y. Zhang et al.), що розширює можливості статичного аналізу від простого детектування до підтримки процесів корекції дефектів [10]. Метод виявлення ін'єкційних вразливостей у Java web-застосунках із застосуванням міжпроцедурного аналізу та методів глибинного навчання досліджують Б. Чжан та колеги (B. Zhang et al.), демонструючи перспективність поєднання статичного аналізу та інтелектуальних технологій програмного коду [11]. Підхід Darcy для автоматизованого виявлення й усунення архітектурних неузгодженостей у Java-проєктах пропонує колектив авторів на чолі з Н. Горбані (N. Ghorbani et al.), що дає

змогу підтримувати відповідність реалізації ПС визначеній архітектурній моделі [12]. Drift-аналіз на основі архітектурних подань, який сприяє ідентифікації відхилень між фактичними залежностями коду та запроєктованою архітектурною структурою ПС, досліджують Б. Узун (B. Uzun) та Б. Текінердоган (B. Tekinerdogan) [13].

Важливе значення для розвитку цієї проблеми мають також дослідження, присвячені методологічним основам застосування статичного аналізу коду для виявлення складних структурних і поведінкових дефектів ПС. Можливості використання статичного тестування безпеки застосунків для аналізу коду та виявлення потенційних дефектів ПЗ аналізують Л. Ма та співавтори (L. Ma et al.), демонструючи універсальність підходів статичного аналізу [14]. Методи виявлення помилок конкурентності в багатопотокових застосунках на основі статичного аналізу сирцевого коду, що підтверджує здатність інструментів аналізу виявляти складні міжкомпонентні залежності ПС, досліджують Д. Гебас (D. Giebas) та Р. Войшчик (R. Wojsczyk) [15].

Попри значний розвиток досліджень у сфері програмної інженерії, низка аспектів забезпечення архітектурної узгодженості ПС залишається недостатньо вивченою. Зокрема, обмежено узагальнено практичні можливості сучасних інструментів статичного аналізу коду для автоматизованого виявлення архітектурних порушень у Java-проектах, а також недостатньо висвітлено проблеми контролю архітектурних залежностей у процесі еволюції ПС. Це зумовлює потребу в системному аналізі архітектурних обмежень, інструментів автоматизованого контролю та узагальненні практичних підходів до їхнього застосування. Запропоноване дослідження спрямоване на часткове усунення зазначених прогалин шляхом аналізу сучасних підходів до забезпечення архітектурної цілісності ПС, дослідження типових архітектурних залежностей у Java-проектах та порівняльного аналізу інструментів статичного аналізу програмного коду. На основі отриманих результатів обґрунтовано рекомендації щодо автоматизованого виявлення архітектурних порушень, що сприяє підвищенню якості та підтриманості ПЗ.

Постановка завдання. Метою статті є розроблення підходів до підвищення архітектурної цілісності ПС шляхом застосування засобів статичного аналізу для автоматизованого виявлення архітектурних порушень у Java-проектах.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

1) проаналізувати сучасні підходи до забезпечення архітектурної цілісності ПС та типові архітектурні залежності в Java-проектах;

2) оцінити можливості інструментів статичного аналізу для виявлення порушень архітектурних правил у Java-проектах;

3) виявити проблеми контролю архітектурної узгодженості ПЗ та обґрунтувати рекомендації щодо автоматизованого виявлення архітектурних порушень.

Виклад основного матеріалу. У сучасній програмній інженерії архітектурна цілісність систем розглядається як важлива передумова забезпечення їхньої підтриманості, масштабованості та стабільності функціонування. У масштабних ПС, зокрема тих, що створюються мовою програмування Java, порушення архітектурних обмежень часто виникають у процесі еволюції коду, розширення функціональності та колективного розроблення. У дослідженнях підкреслюється, що такі відхилення призводять до появи небажаних залежностей між модулями, порушення шарової структури системи та поступового накопичення технічного боргу. З огляду на це значної уваги набуває застосування методів статичного аналізу коду (static code analysis, SCA), які дають змогу автоматично досліджувати структуру ПЗ без його виконання та виявляти архітектурні порушення на ранніх етапах розроблення (табл. 1).

Під час розроблення ПЗ зазначені підходи застосовуються комплексно та інтегруються в процеси керування якістю програмного коду. Архітектурні шаблони формують базову логіку структурування системи, а формалізовані правила залежностей визначають допустимі межі взаємодії між її компонентами. Наприклад, у типовій багатошаровій Java-архітектурі встановлюється правило, згідно з яким сервісний шар використовує рівень доступу до даних, однак він не має безпосередньо взаємодіяти з рівнем представлення. Порушення таких обмежень призводить до ускладнення структури та зниження її підтриманості. На практиці контроль дотримання архітектурних обмежень дедалі частіше реалізується за допомогою інструментів статичного аналізу, які здатні автоматично перевіряти тисячі залежностей між класами та пакетами ПС. У масштабних Java-проектах або на вебплатформах ці інструменти інтегрують CI, де аналіз коду виконується автоматично під час кожної збірки [1, с. 2877]. У разі виявлення небажаних циклічних залежностей або порушення архітектурних правил система формує відповідні повідомлення для розробників

або автоматично блокує інтеграцію змін до основної гілки проєкту. Це забезпечує підтримання архітектурної дисципліни в умовах інтенсивного розроблення, своєчасне виявлення структурних аномалій та запобігання накопиченню технічного боргу, що є особливо важливим для довготривалої еволюції складних ПС.

Архітектурні залежності в Java-проєктах визначають правила взаємодії між пакетами, модулями та класами ПС і є важливим механізмом підтримання її структурної узгодженості. У сучасній програмній інженерії такі залежності формалізуються як архітектурні обмеження, що регламентують допустимі напрями використання компонентів системи. Їхнє дотримання дає змогу зменшити зв'язаність між модулями, підвищити модульність коду та забезпечити стабільну еволюцію програмного продукту (табл. 2).

Так, у Java-проєктах, що реалізуються на основі багатоваріантної архітектури, правила залежностей дають змогу підтримувати чітку логіку взаємодії між компонентами системи. Наприклад, рівень

представлення взаємодії з сервісним шаром, де зосереджена бізнес-логіка, а доступ до бази даних забезпечується через окремий рівень доступу до даних [7, с. 293]. Порушення цього принципу, зокрема прямий виклик бази даних із рівня представлення, призводить до зростання зв'язаності між модулями та ускладнює подальшу модифікацію програмного коду.

У масштабних Java-системах, що містять сотні пакетів і тисячі класів, навіть окремі порушення залежностей поступово формують складну мережу взаємозв'язків, яка знижує модульність ПЗ. Зокрема, виникнення циклічних залежностей між пакетами ускладнює тестування, повторне використання компонентів та рефакторинг системи. З огляду на це в сучасних умовах контроль дотримання архітектурних обмежень дедалі частіше здійснюють за допомогою інструментів SCA, які автоматично перевіряють структуру залежностей під час збірки проєкту [3]. Це дає змогу своєчасно виявляти архітектурні відхилення, підтримувати структурну узгодженість системи та

Таблиця 1

Основні підходи до забезпечення архітектурної цілісності ПС та роль статичного аналізу

Підхід	Основний зміст	Практичне значення
Архітектурне проєктування на основі шаблонів	Використання усталених архітектурних моделей, зокрема модель – подання – контролер (model – view – controller, MVC) та мікросервісна архітектура (microservices architecture, MSA)	Забезпечує структуровану організацію програмного коду та чіткий розподіл функціональних відповідальностей
Формалізація архітектурних правил	Визначення допустимих залежностей між пакетами, модулями або шарами системи	Дає змогу обмежувати небажані залежності між компонентами ПЗ
Статичний аналіз програмного коду	Автоматизований аналіз структури програмного коду без його виконання	Дає змогу виявляти циклічні залежності, порушення архітектурних правил та інші структурні аномалії
Використання архітектурних метрик	Кількісна оцінка складності, зв'язності та рівня залежностей між компонентами системи	Забезпечує об'єктивне оцінювання стану архітектури ПЗ
Інтеграція перевірок у процес безперервної інтеграції та доставлення (continuous integration / continuous delivery, CI/CD)	Автоматичне виконання перевірок архітектури під час збірки програмного продукту	Забезпечує постійний контроль архітектурної структури ПС

Джерело: сформовано автором на основі [1, с. 2877; 2, с. 1826; 3; 7, с. 291; 9; 12, с. 1642]

Таблиця 2

Типові архітектурні залежності та обмеження в Java-проєктах

Тип залежності або обмеження	Характеристика	Значення для структурної якості
Шарова залежність	Взаємодія компонентів системи відповідно до рівнів архітектури	Забезпечує чітке функціональне розмежування модулів
Односпрямованість залежностей	Встановлення допустимого напрямку використання пакетів або класів	Запобігає неконтрольованому поширенню залежностей
Відсутність циклічних залежностей	Заборона взаємних залежностей між пакетами або модулями	Підвищує модульність і спрощує модифікацію системи
Обмеження міжмодульної взаємодії	Регламентування використання компонентів одного модуля іншими	Зменшує зв'язаність між частинами системи
Інкапсуляція внутрішніх компонентів	Обмеження доступу до внутрішніх класів і пакетів	Підтримує стабільність архітектури системи

Джерело: сформовано автором на основі [1, с. 2879; 2, с. 1828; 3; 6, с. 963; 7, с. 293; 13]

запобігати накопиченню технічного боргу в процесі розвитку ПЗ.

Для кращого розуміння механізму контролю архітектурних залежностей у Java-проєктах доцільно розглянути узагальнену схему перевірки архітектурних обмежень засобами SCA.

На рис. 1 наведено логіку автоматизованого контролю архітектурних обмежень у сучасних Java-проєктах. На етапі проєктування визначають архітектурну модель системи, яка описує структуру модулів, шарів і допустимі залежності між ними. Ці правила фіксуються як формалізовані обмеження, які перевіряють інструменти статичного аналізу. Під час аналізу програмного коду система досліджує взаємозв'язки між класами та пакетами й порівнює їх із визначеними архітектурними правилами. У практиці розроблення ПЗ така перевірка часто інтегрується в процес CI/CD. Наприклад, під час автоматичної збірки Java-проєкту система аналізує структуру залежностей і визначає, чи не виникли заборонені зв'язки між модулями. У разі відповідності архітектурним правилам збірка завершується успішно, а з виявленням порушень розробники отримують повідомлення про помилку або система блокує інтеграцію змін в основну гілку проєкту. Такий механізм дає змогу підтримувати архітектурну дисципліну, своєчасно виявляти структурні відхилення та запобігати деградації архітектури ПС у процесі їхнього розвитку.

У сучасних Java-проєктах контроль дотримання архітектурних обмежень дедалі частіше здійснюють за допомогою інструментів SCA. Такі системи автоматично аналізують залежності між класами, пакетами та модулями ПЗ і дають змогу виявляти порушення архітектурних правил ще на етапі розроблення [13]. Сучасні інструменти аналізу відрізняються функціональністю, рівнем автоматизації та глибиною перевірки архітектурних залежностей, що зумовлює доцільність їхнього порівняльного аналізу (табл. 3).

У сучасних умовах розроблення ПЗ зазначені інструменти застосовуються як елемент системи управління якістю програмного коду. Найпоширенішим практичним рішенням у Java-проєктах є використання SonarQube, який під час автоматичної збірки проєкту аналізує структуру залежностей між пакетами та класами й формує звіт про якість коду. Наприклад, у корпоративних веб-застосунках цей інструмент дає змогу виявляти циклічні залежності між модулями або надмірну зв'язаність компонентів, що ускладнює подальший розвиток системи [15, с. 61303]. Такі порушення відображаються як показники технічного боргу та рекомендацій щодо рефакторингу.

Інструменти ArchUnit застосовуються для формалізації архітектурних правил безпосередньо в програмному коді. Розробники можуть визначити правило, згідно з яким класи рівня представлення не повинні напряму звертатися до компо-

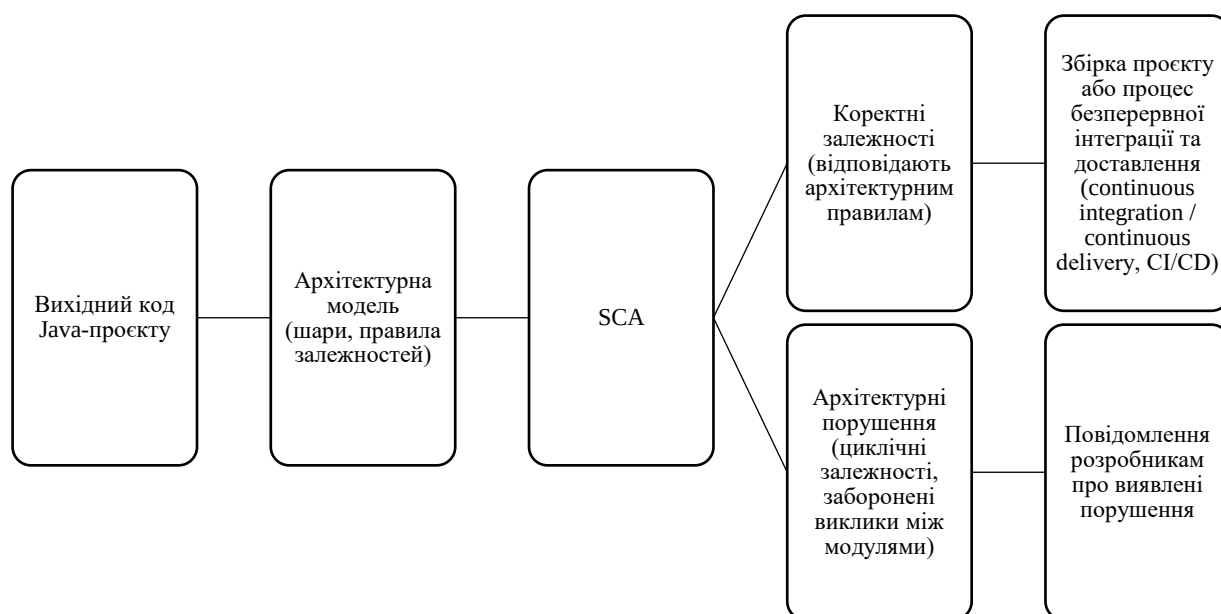


Рис. 1. Схема автоматизованого контролю архітектурних залежностей у Java-проєктах

Джерело: власна розробка автора

**Порівняльна характеристика інструментів статичного аналізу
для виявлення архітектурних порушень у Java-проектах**

Інструмент	Основні функціональні можливості	Виявлення архітектурних порушень	Особливості застосування
SonarQube	Аналіз якості коду, метрик складності, технічного боргу	Виявляє циклічні залежності, надмірну зв'язаність та структурні аномалії	Інтегрується в процес CI/CD
ArchUnit	Бібліотека для формалізації архітектурних правил у коді	Перевіряє дотримання залежностей між пакетами та модулями	Використовується як архітектурні тести
Structure101	Аналіз та візуалізація залежностей між компонентами	Виявляє архітектурну деградацію та складні мережі залежностей	Підтримує аналіз масштабних ПС
jQAssistant	Графовий аналіз структури програмного коду	Дає змогу перевіряти складні архітектурні правила та модульні залежності	Застосовується для аналізу масштабних ПС

Джерело: сформовано автором на основі [3; 4, с. 55829; 8, с. 1131; 9; 14, с. 1173; 15, с. 61303]

ментів рівня доступу до даних. Під час виконання тестів система перевіряє всі залежності в коді та сигналізує про порушення встановлених обмежень. У масштабних проєктах це дає змогу автоматично контролювати тисячі залежностей між пакетами.

Інструменти аналізу залежностей, такі як Structure101 або jQAssistant, застосовують переважно в складних ПС, де важливо оцінити загальну структуру архітектури. Вони дають змогу візуалізувати взаємозв'язки між модулями та виявляти ділянки архітектурної деградації, наприклад, надмірну концентрацію залежностей у певних компонентах системи. Застосування таких інструментів сприяє своєчасній ідентифікації проблемних ділянок програмного коду, підтримці модульності системи та запобіганню накопиченню технічного боргу.

Водночас у процесі супроводу ПС, створених мовою Java, забезпечення їхньої архітектурної узгодженості залишається складним науково-практичним завданням. Однією з основних проблем є поступова деградація архітектури, що виникає внаслідок частих змін коду, розширення функціональності та залучення до розроблення значної кількості фахівців. У таких умовах початкові архітектурні принципи системи часто порушуються, що проявляється появою небажаних залежностей між пакетами, формуванням циклічних зв'язків між модулями або порушенням визначених рівнів архітектури [4, р. 55829]. Додатковою проблемою є складність контролю архітектурних правил у масштабних ПС, де кількість взаємозв'язків між компонентами може досягати тисяч, що робить ручну перевірку структури коду практично неможливою. Унаслідок цього архітектурні порушення накопичуються поступово та формують так званий технічний борг, який ускладнює подальший розвиток ПС,

підвищує складність її модифікації та знижує рівень підтримуваності ПЗ.

Розв'язання зазначених проблем потребує застосування автоматизованих механізмів контролю структури коду, зокрема інструментів SCA. Ці засоби дають змогу системно перевіряти відповідність програмної реалізації визначеним архітектурним правилам та оперативно виявляти порушення залежностей між компонентами системи. Практичні рекомендації щодо автоматизованого виявлення архітектурних порушень у Java-проектах передбачають інтеграцію інструментів статичного аналізу в процес CI/CD, формалізацію архітектурних правил як перевірюваних обмежень між пакетами або модулями, а також регулярний аналіз структурних метрик ПС. Такий підхід дає змогу своєчасно виявляти небажані залежності, підтримувати модульність коду та забезпечувати стабільну еволюцію архітектури ПС у процесі їхнього тривалого використання й розвитку.

Висновки. У результаті дослідження встановлено, що забезпечення архітектурної узгодженості ПС є важливою умовою забезпечення їхньої якості, масштабованості та підтримуваності. Аналіз наукових підходів засвідчив, що ефективний контроль архітектури ПЗ ґрунтується на поєднанні архітектурного проєктування, формалізації правил залежностей між компонентами та використанні інструментів SCA. Доведено, що застосування таких засобів уможливило автоматичне виявлення небажаних залежностей між модулями, циклічні зв'язки та інші структурні порушення ще на ранніх етапах розроблення. Встановлено, що основними проблемами забезпечення архітектурної узгодженості в Java-проектах є поступова деградація архітектури внаслідок еволюції коду, складність контролю значної кількості залежностей між компонентами та накопичення технічного боргу.

Порівняльний аналіз сучасних інструментів статичного аналізу засвідчив, що застосування таких засобів, як SonarQube, ArchUnit, Structure101 та jQAssistant, дає змогу істотно підвищити ефективність автоматизованого контролю архітектурних обмежень. Обґрунтовано рекомендації з автоматизованого виявлення архітектурних порушень у Java-проектах, які передбачають формалізацію

архітектурних правил, інтеграцію інструментів статичного аналізу в процесі CI/CD, а також регулярний моніторинг структурних метрик системи.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробленням інтелектуальних методів аналізу архітектури ПС та застосуванням алгоритмів машинного навчання для прогнозування архітектурних порушень.

Список літератури:

1. Trubiani C., Pinciroli R., Biaggi A., Fontana F. A. Automated detection of software performance antipatterns in Java-based applications. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 2023. Vol. 49, № 4. P. 2873–2891. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSE.2023.3234321>
2. Mendoza C., Bocanegra J., Garcés K., Casallas R. Architecture violations detection and visualization in the continuous integration pipeline. *Software: Practice and Experience*. 2021. Vol. 51, № 8. P. 1822–1845. DOI: <https://doi.org/10.1002/spe.3004>
3. Mehrpour S., LaToza T. D. Can static analysis tools find more defects? A qualitative study of design rule violations found by code review. *Empirical Software Engineering*. 2023. Vol. 28. Article 5. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10664-022-10232-4>
4. Alqaradaghi M., Kozsik T. Comprehensive evaluation of static analysis tools for their performance in finding vulnerabilities in Java code. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 55824–55842. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3389955>
5. Gupta K. K., Shaik M., Kaveri P. R., Awasthi P., Naik S. A., Dhanaraj R. K. Developing an automated script for detecting design pattern in software project using Python. In: *The Future of Business and Society*. CRC Press, 2023. P. 283–291. URL: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003778882-33> (дата звернення: 15.03.2026).
6. Zhao L., Chen S., Xu Z., Liu C., Zhang L., Wu J., Sun J., Liu Y. Software composition analysis for vulnerability detection: An empirical study on Java projects. In: *Proceedings of the 31st ACM Joint European Software Engineering Conference and Symposium on the Foundations of Software Engineering*. 2023. P. 960–972. DOI: <https://doi.org/10.1145/3611643.3616299>
7. Zhang Y., Kabir M. M. A., Xiao Y., Yao D., Meng N. Automatic detection of Java cryptographic API misuses: Are we there yet? *IEEE Transactions on Software Engineering*. 2022. Vol. 49, № 1. P. 288–303. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSE.2022.3150302>
8. Amankwah R., Chen J., Song H., Kudjo P. K. Bug detection in Java code: An extensive evaluation of static analysis tools using Juliet Test Suites. *Software: Practice and Experience*. 2023. Vol. 53, № 5. P. 1125–1143. DOI: <https://doi.org/10.1002/spe.3181>
9. Esposito M., Robredo M., Arcelli Fontana F., Lenarduzzi V. On the correlation between architectural smells and static analysis warnings. *Software Quality Journal*. 2025. Vol. 33. Article 33. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11219-025-09730-7>
10. Zhang Y., Xiao Y., Kabir M. M. A., Yao D., Meng N. Example-based vulnerability detection and repair in Java code. In: *Proceedings of the 30th IEEE/ACM International Conference on Program Comprehension*. 2022. P. 190–201. DOI: <https://doi.org/10.1145/3524610.3527895>
11. Zhang B., Zhi X., Wang M., Ren R., Dong J. Enhancing Java web application security: Injection vulnerability detection via interprocedural analysis and deep learning. *IEEE Transactions on Reliability*. 2025. Vol. 74, № 3. P. 3642–3656. DOI: <https://doi.org/10.1109/TR.2024.3521381>
12. Ghorbani N., Singh T., Garcia J., Malek S. Darcy: Automatic architectural inconsistency resolution in Java. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 2024. Vol. 50, № 6. P. 1639–1657. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSE.2024.3396433>
13. Uzun B., Tekinerdogan B. Detecting deviations in the code using architecture view-based drift analysis. *Computer Standards & Interfaces*. 2024. Vol. 87. Article 103774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csi.2023.103774>
14. Ma L., Yang H., Xu J., Yang Z., Lao Q., Yuan D. Code analysis with static application security testing for Python program. *Journal of Signal Processing Systems*. 2022. Vol. 94, № 11. P. 1169–1182. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11265-022-01740-z>
15. Giebas D., Wojszczyk R. Detection of concurrency errors in multithreaded applications based on static source code analysis. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 61298–61323. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3073859>

Abakumov R.V. AUTOMATED DETECTION OF ARCHITECTURAL VIOLATIONS IN JAVA PROJECTS USING STATIC ANALYSIS

The relevance of the study is determined by the increasing complexity of modern software systems, the growing volume of source code, and the long-term evolution of software products, which complicate maintaining architectural consistency of software systems. In large Java projects, architectural violations often arise during system evolution and functional expansion. Such violations manifest themselves in the emergence of undesirable dependencies between modules, cyclic relations between packages, and violations of layered architecture. These issues lead to the accumulation of technical debt, complicate software maintenance, and reduce system maintainability. Therefore, the use of static code analysis tools becomes increasingly important for automated control of architectural constraints and timely detection of structural deviations in software systems. The purpose of the article is to improve the architectural consistency of software systems through the use of static code analysis tools for automated detection of architectural violations in Java projects. The research applies methods of system analysis of software architectures, comparative analysis of modern static code analysis tools, and generalization of practical approaches to their application in software development. The features of controlling architectural dependencies in Java projects have been investigated, and the capabilities of such tools as SonarQube, ArchUnit, Structure101, and jQAssistant for automated detection of architectural rule violations have been analyzed. Results. The study analyzed modern approaches to ensuring architectural integrity of software systems. It has been established that the main causes of architectural degradation include violations of dependency rules between modules, the emergence of cyclic dependencies, and excessive coupling of system components. It has been proven that the use of static code analysis tools enables automated control of software structure, timely detection of architectural violations, and maintenance of modularity of software systems. The comparative analysis of modern tools demonstrated that their integration into the continuous integration and continuous delivery (CI/CD) process provides effective monitoring of architectural constraints during software development. The conclusions indicate that the use of static analysis tools is an effective mechanism for automated control of software architecture. It has been demonstrated that integrating such tools into software development processes enables the timely detection of structural deviations, reduces technical debt, and supports the stable evolution of Java project architectures. Prospects for further research are related to improving methods for automated analysis of software product architecture and the application of intelligent algorithms for predicting architectural violations.

Keywords: code structure, module dependencies, technical debt, architecture governance, software engineering, software quality.

Дата першого надходження статті до видання: 24.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

UDC 004.93:004.92

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.1/02>**Bondarenko V.S.**<https://orcid.org/0009-0009-1117-4501>

Kharkiv National University of Radio Electronics

Barkovska O.Yu.<https://orcid.org/0000-0001-7496-4353>

Kharkiv National University of Radio Electronics

Trunov V.O.<https://orcid.org/0009-0009-0758-5228>

Kharkiv National University of Radio Electronics

Havrashenko A.O.<https://orcid.org/0000-0002-8802-0529>

Kharkiv National University of Radio Electronics

A METHOD FOR DATASET AUGMENTATION IN IMAGE SEGMENTATION TASKS BASED ON IMAGE SYNTHESIS

This work considers the problem of expanding training datasets for image segmentation tasks, which is particularly relevant given the high cost and labour-intensive nature of manually annotating pixel data. Traditional augmentation approaches based on geometric, photometric and occlusion transformations are compared with generative methods and image synthesis. Although traditional methods remain useful, they do not generate fundamentally new information and therefore have limited potential for increasing the diversity of the training sample. Generative methods and approaches based on image synthesis are analysed separately, and the feasibility of using three-dimensional scenes as a controlled source of realistic data with the possibility of automatically obtaining accurate annotations is justified. A method is proposed for the automated generation of annotated images for segmentation based on three-dimensional scenes, physically based rendering (PBR) of materials and lighting, as well as information accumulated in G-buffers during deferred rendering. Unlike the traditional approach using a custom stencil, the proposed method does not require direct modification of a particular scene and can be applied to scenes that have already been built, which significantly enhances its practical value. The implementation of the method is based on identifying subsets of pixels according to the values of the roughness, metallic and specular parameters, followed by their combination into a final segmentation mask. This approach allows the use of internal scene characteristics that are inaccessible when working solely with a ready-made two-dimensional image, and ensures a high level of control over the data generation process. The paper also presents a comparison of the contents of G-buffers from various engines, including Unreal Engine, Unity, CryEngine, Frostbite and RAGE, which confirms the universality of the general idea whilst highlighting the need to adapt the implementation to a specific environment. The results of experimental studies have shown that the implemented shader-based approach provides segmentation accuracy at a level close to that of the manual method, but significantly outperforms it in terms of processing speed. The segmentation time per frame was also significantly lower than that of the comparable YOLOv8-based approach. At the same time, it has been established that the main drawback of the method remains the lengthy preparatory stage involved in setting up the scene, materials and segmentation parameters. It is concluded that the proposed approach is a promising means of augmenting datasets for neural network segmentation systems, particularly in cases where real-world images are difficult to obtain, whilst three-dimensional models of objects can be created or utilised from existing libraries.

Keywords: dataset, augmentation, neural network, 3D-scene, deferred rendering, PBR.

Formulation of the problem. In computer vision tasks, the quality and size of the training dataset directly influence the model's performance. This is particularly true for image segmentation tasks, where each pixel must be accurately annotated. Creating such datasets is a labour-intensive and costly process, as it involves more than just acquiring images for training. It also requires significant human resources for manual data annotation. Consequently, there is a need for dataset augmentation methods that allow the number of training examples to be increased without a proportional rise in annotation costs.

The study is motivated by the growing need for high-quality, scalable methods for expanding training datasets for image segmentation tasks, which can reduce the costs of manual annotation, improve the generalisation ability of models, and ensure their effectiveness when annotated data is limited.

Analysis of recent research and publications. There are a significant number of approaches to expanding datasets. The most common are classical augmentation methods based on geometric and photometric image transformations, as well as modern methods for synthesising new data using generative models or procedural modelling. Each of these approaches has its own advantages, limitations and areas of application, which must be taken into account when constructing training samples for segmentation tasks (Figure 1).

Furthermore, different methods of dataset augmentation affect the statistical properties of the training data in different ways. Some approaches merely modify existing images whilst preserving their semantic structure, whereas others enable the generation of entirely new scenes and objects. This leads to varying

degrees of data diversity and, consequently, differing levels of effectiveness when training segmentation models. Therefore, a systematic comparison of existing dataset augmentation methods is warranted.

The manual method, which involves acquiring real-world images and segmenting them manually by experts, remains a reliable and historically significant approach because it enables the creation of reference datasets for training and evaluating segmentation algorithms, although its high labour intensity and significant time expenditure substantially limit dataset scale. Image modification, including photometric, occlusion [1], noise augmentation [2-3], and related methods, remains reliable because the image content is essentially preserved and re-labelling is usually unnecessary; however, such methods do not generate fundamentally new information, remain limited by the initial dataset, and may lead to unrealistic images or overfitting when used excessively. Generative augmentation, including GANs (Generative Adversarial Networks) [4], can produce new images, but it does not inherently provide pixel-level class information, which makes additional annotation or complex joint generation of images and masks necessary, while also tending to produce artifacts for rare or uncommon objects. In contrast, generating synthetic images based on three-dimensional scenes [5] is one of the most controllable methods of data synthesis for segmentation tasks, since it allows the construction of scenes with object models, light sources, and a camera, followed by rendering not only the final image but also segmentation maps, depth maps, normal maps, and other auxiliary data, while providing full control over scene parameters and enabling the creation of large and diverse datasets with automatically generated annotations.

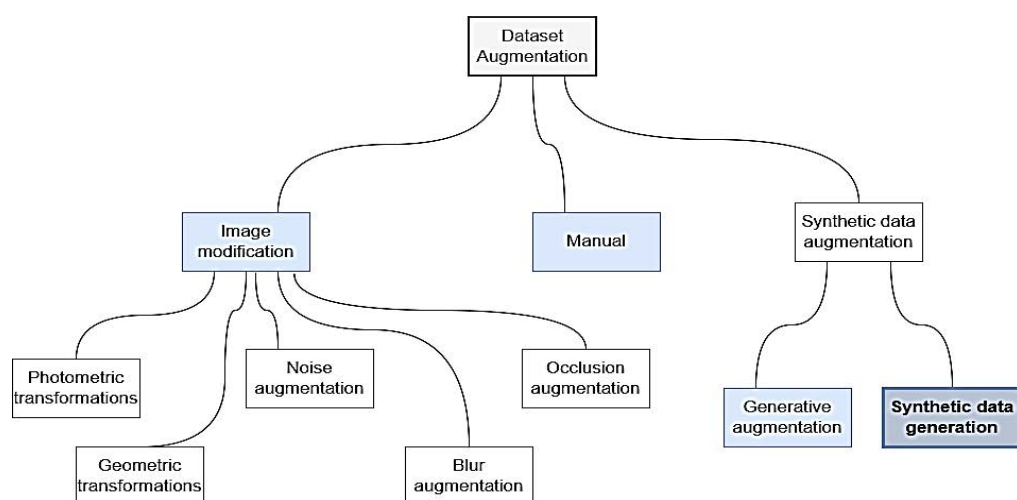


Fig. 1. Classification of methods for datasets augmentation

At the same time, building three-dimensional scenes requires a significant initial investment of effort. Creating high-quality models and scenes often necessitates the involvement of specialists from related fields, such as 3D artists or computer graphics engineers. It is also important to pay close attention to the accuracy of the scene construction: the configuration of materials, lighting, object scales and camera behaviour. An insufficient level of realism can lead to discrepancies between synthetic and real-world data.

Once a basic set of 3D scenes has been created, this approach proves highly efficient in terms of scaling data generation. Significant initial time is required for modelling objects and configuring materials, lighting and scene parameters. However, once this stage is complete, it becomes possible to automatically generate a large number of images with different scene configurations, object positions and camera parameters. At the same time, the corresponding segmentation masks can be generated automatically during the rendering process. Thus, the initial costs of preparing the three-dimensional environment are offset by the ability to rapidly and scalably generate significant volumes of annotated data.

Based on the calculations and estimates reported in [1-5], a comparison was performed. The results of this comparison are presented in Table 1.

Table 1

Comparison of different types of data augmentation methods

Method(s) type	Improving the accuracy of the dataset	What additional calculations are required
Image modification	0,3-1%	Minor computations that can be parallelised. Segmentation is performed on the input image
Generative methods	4-7,1%	Time taken to generate the image, time taken for segmentation
Synthetic images	3,9-6,5%	Segmentation and image generation are carried out in parallel
Manual	0-100%	Significant human effort is required for image acquisition and segmentation.

It follows that the unresolved aspects of the overall problem remain the simultaneous achievement of high accuracy, speed and scalability in the generation of annotated data for segmentation tasks. Manual annotation yields high-quality results but is overly labour-intensive and expensive; classical augmentation methods do not generate fundamentally new information and are limited by the source dataset; generative methods do not always produce accurate

pixel masks and may generate artefacts. At the same time, data synthesis based on 3D scenes is promising, but requires significant initial expenditure on constructing a realistic environment and configuring materials, lighting and scene parameters. Consequently, the task of developing a controllable method for the automated generation of realistic images with accurate annotations, suitable for the effective expansion of segmentation datasets, remains unresolved.

Task statement. The aim of this research is to develop a method for the automated generation of annotated images for segmentation based on 3D scenes and deferred rendering G-buffers, and to evaluate its effectiveness in terms of segmentation accuracy, processing speed and practical suitability for expanding training datasets.

Such a method should not only demonstrate high quantitative performance in terms of accuracy and performance, but also overcome the practical limitations of existing approaches to generating annotated data. In particular, its application should involve not only data specialists, whose demand continues to grow, but also specialists in constructing 3D-scenes and working with 3D engines. Furthermore, the advantages of three-dimensional scenes over real-world images must be taken into account, as they allow for flexible control over the framing, the ability to change the viewpoint - including positioning it at a considerable height, below the surface or in other positions inaccessible to conventional filming, as well as providing access to all elements of the scene and their parameters in the system's memory. Unlike a real image, which, once captured, contains only the final visual result, a three-dimensional scene provides full control over its components, creating additional opportunities for the automated generation of accurate annotations.

Outline of the main material of the study.

Technological components of the 3D scene-based augmentation method. 3D scene-based augmentation is founded on three key technological foundations:

- physically based rendering (PBR);
- deferred rendering architecture;
- the availability of a large number of pre-existing realistic 3D scenes.

Such scenes are currently available both as commercial libraries and as open-source resources created by professional artists and computer graphics enthusiasts.

PBR enables the reproduction of physically consistent material properties and the interaction of light with surfaces, resulting in highly photorealistic images [6]. Deferred rendering, in turn, involves

storing a set of pixel characteristics in special buffers (G-buffers) during the first rendering pass [7]. These characteristics may include surface normals, material properties, scene depth, object identifiers and other parameters. The availability of this information makes it possible to generate additional representations of the scene, such as segmentation maps or other types of annotations. Since PBR relies on a unified approach to material definition, the buffer data associated with similar objects (e.g., plants) do not differ significantly.

Another key factor is the vast number of 3D scenes and models that have been accumulated over many years within the computer graphics, game development and visualisation industries. This allows existing resources to be utilised without the need to create an environment from scratch, which significantly lowers the barrier to entry for generating synthetic datasets. To illustrate this point, Figure 2 shows a bamboo grove scene created by Leo Torres using Unreal Engine 5.2, whilst Figure 3 shows a similar photograph taken by photographer Scott Kelby for comparison.

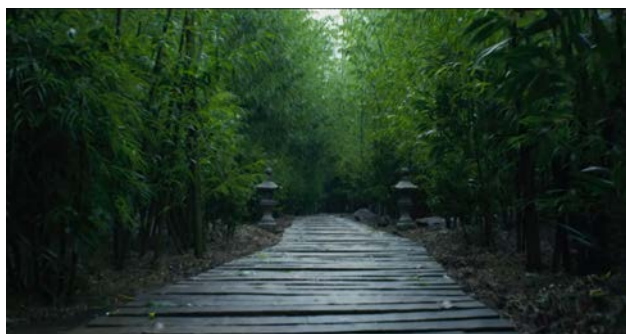


Fig. 2. Virtual bamboo grove



Fig. 3. Photo of a real bamboo grove

Given that these technologies have been actively developed for over a decade, the proposed approach can be regarded as an example of exaptation. According to Rich Geldreich [8], game developers recognised the potential of this technology as early as the early 2000s, although the technology itself is not new

and was described by Michael Frank Dering in [7] as far back as 1988. In this case, tools originally developed for photorealistic visualisation tasks in computer graphics are being repurposed for a different purpose - the automated creation of annotated data for computer vision tasks. This approach allows us to build upon an existing technological foundation and utilise its potential in a related field.

Solution of the stated problem. This paper proposes a method for generating annotated images for segmentation tasks based on the use of three-dimensional scenes and information generated during deferred rendering (Figure 4). The method is based on using material parameters and other scene characteristics stored in G-buffers to automatically identify subsets of pixels that can be interpreted as image segments. It should be noted that this approach differs from the classical one, in which the target object is assigned a custom stencil pass and segmentation of such an object is performed automatically. However, the classical approach has a number of drawbacks. It requires access to the scene development process, whereas our approach, based on deferred rendering, can be applied to compiled scenes, as in [3]. Secondly, as it is based on PBR, the pre-configuration is performed not for a single specific scene, but for a single object across different scenes.

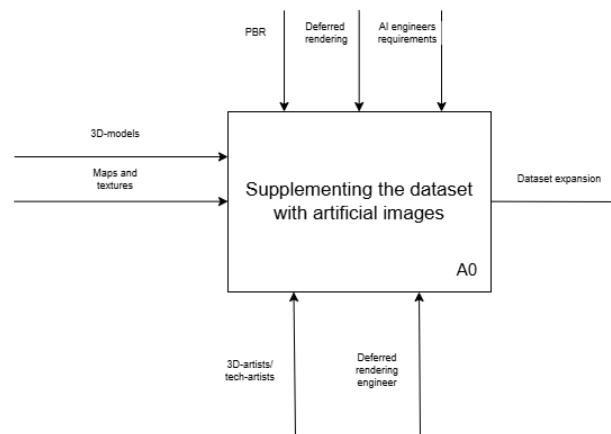


Fig. 4. Context diagram of our method

The research methodology consists of several sequential stages:

- in the first stage, a 3D scene containing the necessary objects, materials and lighting is constructed or selected;

- next, during the scene rendering process, a set of G-buffers is generated, containing material parameters and the geometric characteristics of surfaces. Based on the values of these buffers, subsets of pixels satisfying the specified material parameter ranges are

identified, after which they are combined in accordance with the described mathematical model;

– the final stage involves the software implementation of the proposed approach. This includes the development of appropriate shaders and the configuration of the rendering pipeline, which provide access to the necessary G-buffers and perform operations on their values.

A formal representation of the functional decomposition of the proposed method is shown in Figure 5.

The implementation of G-buffers - specifically, the information they contain - may vary across different engines. It is also worth noting that the term ‘G-buffer’ is not always used in the documentation, so as not to mislead the user when referring to an engine-specific implementation. For example, the RAGE engine distinguishes between the Velocity buffer and G-buffers. However, for simplicity, we will use the term ‘G-buffer’ to refer to the pixel information collected during the first pass of rendering.

Table 2 contains information on the differences in the contents of G-buffers across various engines, such as Unreal Engine, Cry Engine, Unity, RAGE and Frostbite, as described in [9-15]. The proprietary RAGE and Frostbite engines do not have public documentation, so we can only rely on presentations and reverse engineering.

Next, we consider the implementation of the proposed method in Unreal Engine. Let us take a closer look at the methodology represented by A2 in the diagram in Figure 5.

Let P be the set of all pixels in the image.

$r(p)$ denote the value of the roughness buffer at pixel p ;

$m(p)$ the value of the metallic buffer at pixel p ;

$s(p)$ the value of the specular buffer at pixel p .

Then define the subsets of pixels whose values belong to the prescribed intervals. The subset of pixels whose roughness values belong to the interval $[r(a_i); r(b_i)]$ is defined by

Table 2

Differences in G-buffers across different engines

Engine	Unique information in G-buffers	Missing information in G-buffers
Unreal Engine	Per-object GBuffer data. Selective output mask	Classical world-space XYZ coordinates are not stored directly; instead, depth and transformation matrices are used
Frostbite	Smoothness. Material id	Alpha and material ID are packed into a single channel; radiosity and emissive color are also packed together
CryEngine	Baked AO. Subsurface scattering. Gloss/Smoothness	Depth and transformation matrices are used instead of explicit XYZ coordinates
Unity	MaterialFlags	Emission, lighting, lightmaps, and reflection maps are accumulated in a single channel; no explicit metalness
RAGE	Velocity buffer; includes several channels not assigned to fixed purposes and usable, for example, separately for hair	Does not always store the classical PBR parameter set in separate channels

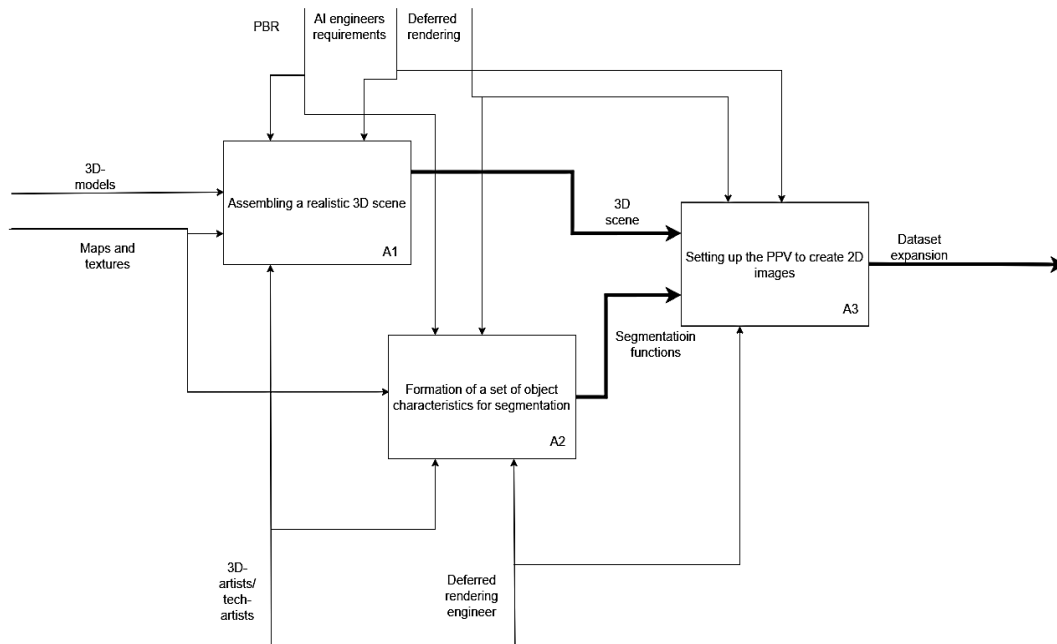


Fig. 5. Functional decomposition of our method

$$R_i = \{p \in P | r(a_i) \leq r(p) \leq r(b_i)\}.$$

The subset of pixels whose metallic values belong to the interval $[m(c_i); m(d_i)]$ is defined by

$$M_i = \{p \in P | m(c_i) \leq m(p) \leq m(d_i)\}.$$

The subset of pixels whose specular values belong to the interval $[s(e_i); s(g_i)]$ is defined by

$$S_i = \{p \in P | s(e_i) \leq s(p) \leq s(g_i)\}.$$

It should be noted that deferred rendering uses a significantly larger number of G-buffers, including normals, depth, albedo, and others. However, for the experiments considered in this paper, it is sufficient to use only the three aforementioned buffers: roughness, metallic, and specular:

$$T_i = R_i \cap M_i \cap S_i,$$

where T_i is the subset of pixels for which all three conditions are satisfied simultaneously.

This set is intended to represent the set of pixels belonging to the particular object under study and to be segmented. At this stage, it is not necessary for T_i to cover all pixels of the given object. The essential requirement is that it should not contain pixels belonging to other objects. Next, we construct the family of sets $\{T_i\}_{i=1}^n$. Define the set $T = \bigcup_{i=1}^n T_i$.

In this case, the number n of subsets may be large in order to satisfy the stated conditions while covering all pixels belonging to the object. Increasing the number of such subsets often, though not necessarily, improves the accuracy of the proposed method.

Results of empirical studies. Discussion of the results. Table 3 presents the parameter values that define the intervals for constructing the sets introduced above.

By implementing a shader based on the defined sets, we obtain a frame with the segmentation already applied, as shown in Figure 6. This image also displays the G-buffers used, where 0 represents a black pixel and 1 represents a white pixel.

Once the method has been implemented, we obtain a large number of images to expand the dataset. Figure 7 shows some of them.

A comparative analysis of the performance of our method is presented in Table 4, based on the following criteria:

- segmentation accuracy;
- segmentation speed;
- preparation time.

Segmentation speed is measured in seconds. For other methods, it is assumed that the frame is already

Table

The intervals for constructing the sets

i	$r(a_i)$	$r(b_i)$	$m(c_i)$	$m(d_i)$	$s(e_i)$	$s(g_i)$
1	0	1	0,01	1	0	1
2	0,3	1	0	1	0,45	0,55

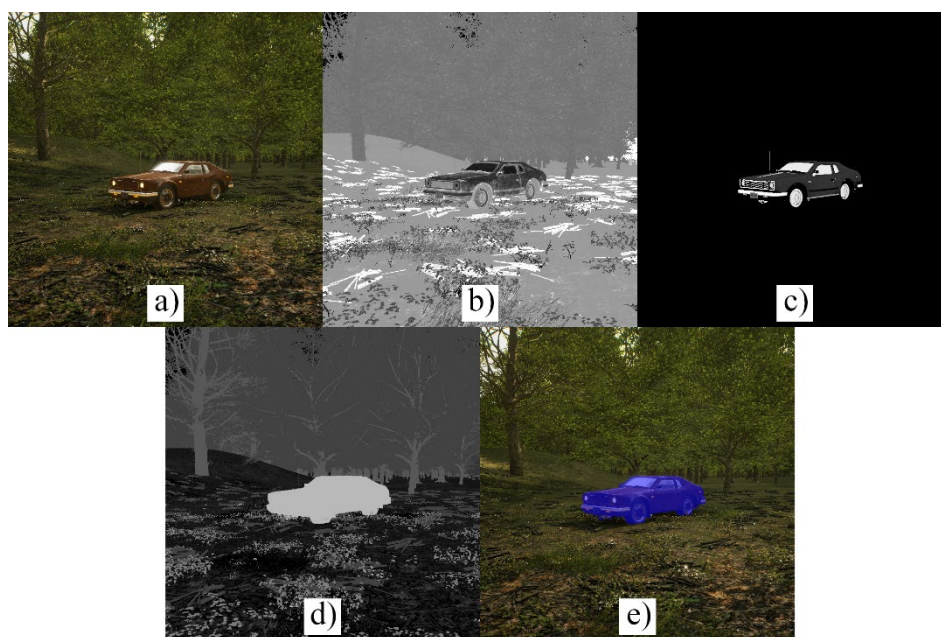


Fig. 6. Frame pipeline: (a) original frame, (b) roughness buffer, (c) metallic buffer, (d) specular buffer, (e) segmented frame



Fig. 7. Generated frame with segmentation

prepared for segmentation, whereas in our method described in this paper, the time taken to generate the frame is also taken into account, given that segmentation and generation are performed in parallel.

Preparation speed, described in terms of fuzzy logic, includes only configuration and parameter selection and does not account for the time spent on software implementation. The measurements take the average value from 10 experiments conducted.

Table 4

Comparison of numerical parameters for dataset augmentation methods

	Our method	YOLOv8	Manual way
Segmentation accuracy	98,85%	88,53%	99.9%
Segmentation speed	0,067 c	1,52 c	40 c
Preparation time	Long	Very fast	Not required

As shown, our method achieves high segmentation accuracy, comparable to that of the manual approach, whilst significantly outperforming both the manual approach and YOLOv8 in terms of processing speed. This makes it effective for tasks where speed and result quality are critical. At the same time, the main drawback is the considerable length of the preparatory stage, which may complicate its practical implementation. Despite this, it can be regarded as a useful addition to existing dataset augmentation methods.

Conclusions. This paper proposes a method for the automated generation of annotated images for

segmentation based on 3D scenes and deferred rendering G-buffers. Within the scope of the research, a segmentation method was developed using the roughness, metallic, and specular parameters stored in G-buffers and the construction of pixel subsets with their subsequent merging into a segmentation mask. Based on this model, a shader was implemented that ensures the automatic generation of a segmented image during rendering.

The results confirmed the effectiveness of the approach, demonstrating high segmentation accuracy and high processing speed, since computations are performed on the graphics processing unit by default. The approach also provides full control over scene parameters, which distinguishes it from methods based only on captured real-world images. Its main drawback remains the lengthy preparatory stage associated with scene setup and segmentation parameter adjustment. Despite this limitation, the method is practically suitable for expanding training datasets and may be especially useful for objects whose 3D models are relatively easy to create, while real-world images are difficult to obtain or are not publicly available.

Further research will focus on analyzing the improvement in neural network accuracy achieved when training uses images generated by the proposed method, comparing the results with those obtained using other methods, and assessing the complexity of implementing this method for more complex and realistic scenes.

Bibliography:

1. Cubuk E. D., Zoph B., Mane D., Vasudevan V., Le Q. V. Autoaugment: Learning augmentation strategies from data. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2019.00020>
2. Cubuk E. D., Zoph B., Shlens J., Le Q. V. Randaugment: Practical automated data augmentation with a reduced search space. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/CVPRW50498.2020.00359>
3. DeVries T., Taylor G. W. Improved regularization of convolutional neural networks with cutout. *arXiv preprint arXiv:1708.04552*. 2017. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1708.04552>
4. Frid-Adar M., Klang E., Amitai M., Goldberger J., Greenspan H. Synthetic data augmentation using GAN for improved liver lesion classification. *2018 IEEE 15th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI 2018)*. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISBI.2018.8363576>
5. Richter S. R., Vineet V., Roth S., Koltun V. Playing for data: Ground truth from computer games. *European Conference on Computer Vision*. Cham: Springer International Publishing, 2016. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-46475-6_7
6. Cui J. Comparative Analysis of PBR and NPR: Technical Pathways, Resource Investment and Applicability. *Science and Technology of Engineering, Chemistry and Environmental Protection*. 2025. Vol. 1, No. 1. DOI: <https://doi.org/10.61173/brg0ar49>
7. Deering M. et al. The triangle processor and normal vector shader: a VLSI system for high performance graphics. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*. 1988. Vol. 22, No. 4. P. 21–30. DOI: <https://doi.org/10.1145/378456.378468>
8. Geldreich R. The Early History of Deferred Shading and Lighting. Rich Geldreich. URL: <https://sites.google.com/site/richgel99/the-early-history-of-deferred-shading-and-lighting> (Accessed: March 22, 2026).
9. Richter S. R., Abu AlHaija H., Koltun V. Enhancing photorealism enhancement. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2022. Vol. 45, No. 2. P. 1700–1715. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2022.3166687>
10. New Shading Models and Changing the GBuffer. Epic Developer Community. 07.12.2022. URL: <https://dev.epicgames.com/community/learning/tutorials/2R5x/unreal-engine-new-shading-models-and-changing-the-gbuffer> (Accessed: March 22, 2026).
11. Deferred Rendering Path in URP. Unity Documentation. Version 12.0.0. URL: <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.render-pipelines.universal@12.0/manual/rendering/deferred-rendering-path.html> (Accessed: March 22, 2026).
12. Courrèges A. GTA V - Graphics Study. Adrian Courrèges. 02.11.2015. URL: <https://www.adriancourreges.com/blog/2015/11/02/gta-v-graphics-study/> (Accessed: March 22, 2026).
13. Hüseyin. Graphics Study: Red Dead Redemption 2. Dear World. 19.06.2020. URL: <https://imgeself.github.io/posts/2020-06-19-graphics-study-rdr2/> (Accessed: March 22, 2026).
14. Lagarde S. SIGGRAPH 2014: Moving Frostbite to Physically Based Rendering V3. Sébastien Lagarde. 14.07.2015. URL: <https://seblagarde.wordpress.com/2015/07/14/siggraph-2014-moving-frostbite-to-physically-based-rendering/> (Accessed: March 22, 2026).
15. Deferred Rendering Techniques. CRYENGINE Documentation. URL: <https://www.cryengine.com/docs/static/engines/cryengine-3/categories/1638401/pages/1605647> (Accessed: March 22, 2026).

Бондаренко В.С., Барковська О.Ю., Трунов В.О., Гаврашенко А.О. МЕТОД РОЗШИРЕННЯ ДАТАСЕТІВ ДЛЯ ЗАДАЧІ СЕГМЕНТАЦІЇ НА ОСНОВІ СИНТЕЗУ ЗОБРАЖЕНЬ

У статті розглянуто проблему розширення навчальних датасетів для задач сегментації зображень, яка є особливо актуальною через високу вартість і трудомісткість ручного анотування піксельних даних. Порівняно традиційні підходи до аугментації, засновані на геометричних, фотометричних та оклюзійних перетвореннях, генеративні методи та синтез зображень. Традиційні методи хоч і залишаються корисними, не забезпечують формування принципово нової інформації, а тому мають обмежений потенціал щодо підвищення різноманітності навчальної вибірки. Окремо проаналізовано генеративні методи та підходи, що базуються на синтезі зображень, і обґрунтовано доцільність використання тривимірних сцен як керованого джерела реалістичних даних із можливістю автоматичного отримання точних анотацій. Запропоновано метод автоматизованого формування анотованих зображень для сегментації на основі тривимірних сцен, фізично коректного моделювання матеріалів і освітлення (PBR), а також інформації, що накопичується в G-буферах під час відкладеного рендерингу.

На відміну від класичного підходу з використанням *custom stencil*, запропонований метод не вимагає прямого втручання в процес побудови конкретної сцени та може бути застосований до вже створених або скопійованих сцен, що суттєво підвищує його практичну цінність. Реалізація методу ґрунтується на виділенні підмножин пікселів за значеннями параметрів *roughness*, *metallic* і *specular* з подальшим їх об'єднанням у підсумкову сегментаційну маску. Такий підхід дозволяє використовувати внутрішні характеристики сцени, недоступні при роботі лише з готовим двовимірним зображенням, і забезпечує високий рівень керованості процесом формування даних. У роботі також наведено порівняння вмісту G-буферів різних рушіїв, зокрема *Unreal Engine*, *Unity*, *CryEngine*, *Frostbite* та *RAGE*, що підтверджує універсальність загальної ідеї та водночас вказує на необхідність адаптації реалізації до конкретного середовища. Результати експериментальних досліджень показали, що реалізований шейдерний підхід забезпечує точність сегментації на рівні, що є близьким до мануального способу, але суттєво перевершує його за швидкістю обробки. Час сегментації одного кадру становить також значно краще за показники порівнюваного підходу на основі *YOLOv8*. Водночас встановлено, що основним недоліком методу залишається тривалий підготовчий етап, пов'язаний із налаштуванням сцени, матеріалів і параметрів сегментації. Зроблено висновок, що запропонований підхід є перспективним засобом доповнення датасетів для нейромережових систем сегментації, особливо в тих випадках, коли реальні зображення важко отримати, а тривимірні моделі об'єктів можна створити або використати з наявних бібліотек.

Ключові слова: датасет, аугментація, нейромережа, 3D-сцена, відкладений рендеринг, PBR.

Дата першого надходження статті до видання: 24.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Боряк К.Ф.

<https://orcid.org/0000-0003-4226-0102>

Національний університет «Одеська морська академія»

Ігнатенко О.А.

<https://orcid.org/0009-0009-6938-6208>

Національний університет «Одеська морська академія»

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ОПЕРАТИВНОГО ОЦІНЮВАННЯ ПОТОЧНОГО ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СУДНОВИХ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ

У статті розглядаються питання автоматизації процесу параметричної діагностики дизельних двигунів морського виконання на основі новітнього експрес-методу оперативної оцінки їх технічного стану у процесі їх стартової підготовки до виходу в море. Актуальність роботи зумовлена тим, що сучасні великотоннажні кораблі оснащуються складними бортовими системами моніторингу енергетичних установок, тоді як використання подібних рішень на маломірних бойових і спеціалізованих плавзасобах обмежується високою вартістю залучення для проведення ТО сторонніх фахівців, складністю експлуатації та необхідністю спеціальної підготовки персоналу. Унаслідок цього на швидкохідних катерах переважно застосовуються спрощені інтегровані системи контролю, які відображають лише базові експлуатаційні параметри роботи дизельних двигунів. У попередніх дослідженнях авторами було запропоновано новий експрес-метод оцінювання технічного стану дизельних двигунів під час їх стартового прогріву, що ґрунтується на аналізі швидкості зміни тиску мастила та різниці температури оборотної води в циркуляційній системі протягом визначеного часового інтервалу. Разом з тим практична реалізація методу вимагає ручної фіксації показників і виконання розрахунків, що в умовах суттєвого обмеження часу під час стартового прогріву двигуна, наявність суб'єктивного фактору виникнення похибки у вхідних даних знижують достовірність зроблених розрахунків на цих даних і як наслідок діагностичних висновків. Для усунення цих недоліків пропонується автоматизувати процес діагностування і отримання експертного рішення шляхом розробки програмного забезпечення у вигляді спеціального застосунку «DieselDiagnostic» для мобільних приладів (смартфон або планшет), які є в наявності у членів екіпажу катера і який працює в автономному режимі. Програмний застосунок забезпечує введення експлуатаційних параметрів, автоматичне визначення швидкості їх зміни, порівняння з нормативними критеріями та формування діагностичного висновку щодо технічного поточного стану двигуна. Запропоноване рішення сприяє зменшенню впливу людського фактору, підвищенню оперативності прийняття рішень і вдосконаленню технічного контролю енергетичних установок швидкохідних катерів.

Ключові слова: суднові дизельні двигуни, експрес-метод оцінювання, технічний поточний стан швидкохідних катерів, автоматизація процесу діагностування, застосунок для мобільних приладів «DieselDiagnostic»

Постановка проблеми. Дизельні двигуни морського виконання залишаються базовим елементом енергетичних установок більшості кораблів і суден різного призначення. Їх експлуатаційна надійність безпосередньо визначає рівень безпеки мореплавства, економічну ефективність перевезень, а у військовому аспекті, бойову готовність кораблів та успішність виконання призначених завдань. У сучасних умовах забезпечення морської безпеки, інтенсифікації навігації, поси-

лення екологічних вимог та ускладнення режимів роботи пропульсивного комплексу проблема раннього виявлення деградаційних процесів і об'єктивної оцінки поточного технічного стану головних та допоміжних дизельних двигунів набуває особливої актуальності.

У цивільному судноплаванні, окрім повсякденних експлуатаційних викликів, існують додаткові чинники, що суттєво підвищують вимоги до підтримання працездатності енергетичної

установки та безперервного контролю її технічного стану. Зокрема, мінна небезпека в окремих районах з інтенсивним судноплавством, особливо в акваторіях, що зазнали воєнних дій або характеризуються підвищеною військово-політичною напруженістю, зумовлює необхідність частих змін курсу та швидкості, виконання різких маневрів ухилення та роботи в умовах обмеженого часу на прийняття рішень. У таких ситуаціях енергетична установка функціонує в несталих і близьких до гранично допустимих, а під час бойових дій і в критично небезпечних для експлуатації режимах, що супроводжується зростанням динамічних і тепломеханічних навантажень на вузли та системи двигуна.

Додатково у низці регіонів зберігається загроза піратства, що потребує забезпечення максимально можливої швидкості руху судна та підтримання енергетичної установки в режимі підвищеної оперативної готовності. Це передбачає здатність головних двигунів до швидкого переходу з часткових навантажень на режим повної потужності без зниження надійності, а також тривалу експлуатацію поблизу номінальних або гранично допустимих теплових і механічних параметрів. У бойових умовах або під час виконання спеціальних завдань військовими кораблями двигуни додатково зазнають інтенсивних маневрових режимів, що значно підвищує швидкість зношування, теплову напруженість деталей та ризик формування прихованих дефектів.

Особливої уваги заслуговує тенденція до скорочення нормативного часу підготовки енергетичної установки до стартового виходу. Запуск двигуна за скороченою процедурою змінює характер перехідних процесів пуску та прогріву: формування мастильного клину, стабілізація теплових зазорів і вихід на розрахункові параметри відбуваються за умов підвищених градієнтів температур і тисків. Це створює передумови для розвитку мікропошкоджень, прискореного старіння мастильних матеріалів і локальних перевантажень, які на початкових стадіях не фіксуються наявними бортовими приладами контролю.

Таким чином, поєднання екологічних обмежень, необхідності забезпечення високої швидкості та маневреності, мінної небезпеки, піратських загроз і бойових факторів формує новий спектр експлуатаційних навантажень на судові дизельні двигуни. За таких умов традиційні підходи до оцінювання технічного стану, орієнтовані переважно на контроль граничних абсолютних значень параметрів, є недостатніми для своєчасного виявлення

початкових стадій наднормованого розвитку деградаційних процесів в двигуні.

Зазначені обставини обумовлюють актуальність розроблення нових експрес-методів оперативної діагностики, здатних забезпечити інформаційну чутливість до ранніх змін технічного стану без щоденного застосування складних і дорогартісних апаратних рішень. Особливо перспективним є використання аналізу перехідних процесів пуску та прогріву, а також швидкостей зміни визначальних параметрів (тиску мастила, температури охолоджувальної рідини, частоти обертання тощо), як інформативних діагностичних ознак.

Логічним продовженням цього підходу є необхідність розробки спеціалізованого програмного забезпечення для автоматизації процесу оперативного діагностування на основі нового експрес-методу, описаного Боряк К.Ф., Ігнатенко О.А. в роботі [1], що дозволить інтегрувати алгоритми обробки та нормалізації сигналів у штатні бортові інформаційні системи, мінімізувати вплив людського фактору, забезпечити формування індексу технічного стану в режимі реального часу та накопичення бази даних для подальшого аналізу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У міжнародній морській практиці забезпечення надійності та безперервності функціонування судових енергетичних установок розглядається, як один із ключових чинників безпеки мореплавства та ефективності експлуатації флоту. У документах [2, 3] сформовано міжнародні нормативні вимоги до проектування, експлуатації та технічного контролю судових енергетичних установок, спрямовані на забезпечення безперервної та безпечної роботи головної пропульсивної установки і допоміжних механізмів протягом усього рейсу. Зокрема, у документах International Maritime Organization та положеннях International Convention for the Safety of Life at Sea визначено необхідність забезпечення високого рівня надійності судових механізмів, можливості підтримання працездатності енергетичної установки у різних експлуатаційних режимах, а також проведення регулярного технічного нагляду і контролю параметрів її роботи.

У документах [4–6] відображено підхід військово-морських стандартів до забезпечення надійності та живучості корабельних енергетичних установок, що застосовуються на військових кораблях країн НАТО. У нормативних документах, зокрема у NATO Naval Ship Code (ANEP-77), визначено вимоги до відмовостійкості пропуль-

сивних систем, резервування критичних елементів та забезпечення функціональної стійкості енергетичних установок під час виконання бойових і службових завдань. Відповідні підходи передбачають збереження можливості керування кораблем навіть у разі відмови окремих елементів енергетичної системи, а також підвищення її живучості в умовах інтенсивних експлуатаційних перенавантажень.

Разом із тим аналіз міжнародних нормативних документів і стандартів свідчить, що навіть за умов суворого дотримання регламентних термінів технічного обслуговування та експлуатації не виключається ймовірність виникнення непередбачуваних відмов суднових енергетичних установок. Найбільш критичними з точки зору забезпечення ходової надійності судна або корабля є відмови головних дизельних двигунів, що працюють в умовах значних теплових і механічних навантажень. При цьому деградаційні процеси елементів циліндро-поршневої групи, паливної апаратури та систем змащування на початкових стадіях можуть не супроводжуватися виходом контрольованих параметрів за встановлені межі.

У зв'язку з цим одним із перспективних напрямів підвищення надійності суднових енергетичних установок є впровадження методів оперативної технічної діагностики та безперервного моніторингу технічного стану головних дизельних двигунів, що дозволяє своєчасно виявляти початкові стадії розвитку несправностей і підвищувати ефективність управління їх експлуатаційною надійністю.

У наукових публікаціях останніх років простежується тенденція до переходу від планово-попереджувальної системи технічного обслуговування до концепції обслуговування за технічним станом (Condition-Based Maintenance). Такий підхід базується на аналізі поточних експлуатаційних параметрів та їх змін у часі. Разом з тим більшість робіт зосереджена на контролі стаціонарних режимів або на виявленні вже розвинених дефектів, тоді як ранні стадії деградації залишаються недостатньо дослідженими.

Так Волянський С. М., Шумило О. М., Мельник О. М., Котенко О. В., Іванов Г., Полянський П. роботах [7–9] розглядають сучасні підходи до діагностики та прогнозування технічного стану суднових дизельних двигунів, основані на інтелектуальних методах обробки даних. Ці дослідження спрямовані на виявлення деградаційних процесів, прогнозування відмов і підвищення ефективності технічного обслуговування шляхом урахування як динаміки

зміни параметрів, так і стохастичного характеру відмов елементів енергетичних установок.

Зокрема, Волянський С. М., Шумило О. М., Мельник О. М., Котенко О. В. Zhang Y., Li H. у роботі [7] запропонували підхід до моделювання деградаційних процесів у суднових дизельних двигунах на основі аналізу часових рядів експлуатаційних параметрів, що дозволяє виявляти тенденції зміни технічного стану та оцінювати динаміку розвитку несправностей. На відміну від існуючих робіт, у яких переважно розглядається прогнозування відмов окремих компонентів або застосування алгоритмів машинного навчання без інтеграції системного рівня оцінювання, у даному дослідженні запропоновано модель, що враховує взаємозалежність деградації вузлів та її вплив на інтегральну ефективність функціонування морської платформи. Іванов Г., Полянський П. у дослідженні [8] розглянули ймовірно-статистичне оцінювання надійності деталей суднових дизельних двигунів з урахуванням одночасної дії зносу та випадкових відмов. Отримані емпіричні залежності дозволяють прогнозувати ймовірність аварійних відмов елементів циліндро-поршневої групи та обґрунтовувати періодичність технічного обслуговування. У свою чергу, Zhang Y., Li H. у роботі [9] дослідили можливості застосування методів машинного навчання для діагностики несправностей суднових дизельних двигунів, що дозволяє автоматизувати процес виявлення аномалій у роботі обладнання та підвищити точність класифікації технічних станів.

Варбанець Р. А., Мінчев Д. С., Кучеренко Ю. М., Залож В. І., Рибальченко М. Є., Білоусов Є. В., Савчук В. П., Самойлов О. О., Сіманенков А. Л., Левінський М. В., Залож В. І. у роботах [10–14] розглядають сучасні підходи до автоматизації процесів контролю технічного стану суднових дизельних двигунів та впровадження інформаційно-вимірювальних систем оперативної діагностики. Зазначені дослідження об'єднує спрямованість на використання цифрових технологій, сенсорних систем та програмних засобів для безперервного моніторингу параметрів роботи енергетичних установок з метою своєчасного виявлення відхилень у їх функціонуванні.

Зокрема, Варбанець Р. А., Мінчев Д. С., Кучеренко Ю. М., Залож В. І. у роботі [10] представили систему параметричної діагностики суднових дизельних двигунів у режимі реального часу, що базується на використанні сучасних мікроконтролерів, сенсорів тиску та вібрації, а також бездротових інтерфейсів передачі даних на мобільні

пристрої. Такий підхід дозволяє оперативно контролювати параметри робочого процесу двигуна та аналізувати технічний стан його основних вузлів. Рибальченко М. Є., Білоусов Є. В., Савчук В. П. у дослідженні [11] запропонували методику цифрової обробки індикаторних діаграм двигуна внутрішнього згоряння, що реалізована у вигляді програмного модуля для визначення діагностичних параметрів на режимах, відмінних від номінальних. Отримані результати підтверджують можливість використання програмних засобів для оцінювання технічного стану двигуна за результатами аналізу робочих процесів.

Самойлов О. О., Сіманенков А. Л., Залож В. І. у роботах [12, 14] розглянули сучасні тенденції розвитку автоматизованих систем технічної діагностики суднових енергетичних установок, зокрема впровадження технологій predictive maintenance, алгоритмів аналізу експлуатаційних даних та інтеграції портативних діагностичних засобів у системи управління технічним станом механізмів. При цьому наголошується на необхідності переходу від періодичних регламентних перевірок до систем безперервного параметричного моніторингу, які дозволяють своєчасно виявляти початкові стадії деградаційних процесів і прогнозувати можливі відмови обладнання. Дослідження Левінського М. В. [13] доповнює цей напрям розробленням автоматизованих засобів контролю стану мастильних систем суднових дизель-генераторів, що базуються на аналізі даних сенсорів і формуванні рекомендацій для оператора щодо подальшої експлуатації обладнання.

Таким чином, результати досліджень Варбанець Р. А., Мінчев Д. С., Кучеренко Ю. М., Залож В. І., Рибальченко М. Є., Білоусов Є. В., Савчук В. П., Самойлов О. О., Сіманенков А. Л., Левінський М. В., Залож В. І. [10–14] свідчать про зростання ролі автоматизованих систем моніторингу та діагностики технічного стану суднових енергетичних установок, які базуються на використанні доступних сенсорних засобів, цифрових методів обробки даних і програмного забезпечення для оперативного аналізу параметрів роботи механізмів. Впровадження таких підходів дозволяє підвищити ефективність контролю технічного стану обладнання, своєчасно виявляти деградаційні процеси та попереджати можливі відмови суднових технічних засобів.

У попередніх працях авторів цієї статті Боряк К.Ф., Ігнатенко О.А. [1, 15, 16] розглядаються сучасні підходи до експрес-оцінки технічного стану суднових механізмів, зокрема дизельних

двигунів. Боряк К.Ф., Ігнатенко О.А. у дослідженні [1] запропонували метод прогнозування розвитку деградаційних процесів на основі оперативної інформації від бортових сенсорів, що дозволяє визначати тенденції зміни технічного стану обладнання в реальному часі та своєчасно виявляти перші ознаки його деградації. Автори підкреслюють важливість швидкого отримання інформації для підвищення надійності суднових механізмів і запобіганню виникнення аварійних ситуацій.

Боряк К.Ф., Ігнатенко О.А. у роботі [15] дослідили визначення критичних значень параметрів для практичного застосування експрес-методу діагностики стану суднових дизельних двигунів. Визначення таких критичних значень дозволяє нормувати процедуру оцінки стану обладнання та підвищити точність прогнозування можливих відмов, що є ключовим для оперативного прийняття рішень щодо технічного обслуговування. Крім того, автори відзначають необхідність інтеграції алгоритмів діагностики з автоматизованими системами моніторингу на борту.

Боряк К.Ф., Ігнатенко О.А. у дослідженні [16] провели тестування нового експрес-методу для оперативної оцінки стану суднових дизельних двигунів, зокрема виробництва Cummins Inc. Результати показують, що метод забезпечує достатню прийнятну точність визначення діагностичних параметрів та швидкість оцінки, що робить його перспективним для застосування в умовах обмеженого часу і ресурсів. На підставі аналізу всіх трьох робіт можна зробити висновок про перспективність і необхідність автоматизації процесу експрес-діагностики технічного поточного стану суднових дизельних двигунів. Результати досліджень свідчать, що запропоновані методи дозволяють оперативно оцінювати технічний стан двигунів, прогнозувати розвиток деградаційних процесів та своєчасно виявляти потенційні відмови навіть у режимах обмеженого часу та ресурсів.

У цьому контексті особливої актуальності набуває розроблення експрес-методів параметричної оперативної діагностики, реалізованих у вигляді програмних застосунків для мобільних платформ (планшетів або смартфонів). Використання таких рішень дозволяє автоматизувати процеси контролю технічного стану енергетичних установок, підвищує швидкість і точність прийняття рішень щодо технічного обслуговування та забезпечує можливість проведення первинної діагностики навіть технічно не підготовленим рядовим членам екіпажу (матросам).

Таким чином, поєднання експрес-методів діагностики з мобільними програмними платформами створює ефективний інструмент для оперативного контролю та підтримання надійності суднових дизельних двигунів, що є критично важливим в умовах інтенсивної експлуатації, обмежених ресурсів технічного обслуговування та високих вимог до безпеки мореплавства.

Постановка завдання. Як було зазначено авторами Боряк К.Ф., Ігнатенко О.А. в попередній статті [15] сучасні військові кораблі та катери оснащуються бортовими електронними системами управління та контролю технічного стану з різним рівнем інформативності та діагностичних можливостей. Кораблі великої водотоннажності (фрегати, корвети) обладнані потужними електронними комплексами керування, моніторингу та діагностики, які дозволяють контролювати окремі механізми, автономні рухові групи та весь пропульсивний комплекс корабля. Ці системи відзначаються широким спектром моніторингових функцій та діагностичних параметрів, що забезпечується, зокрема, використанням сучасних діагностичних технологій: датчики та вимірювальні прилади, бортові інформаційні та контрольні панелі (ECU, EMU, EIM), системи збору, збереження та відображення даних (MTS, LOP, LOS DE/GT), програмне забезпечення системи діагностики та аналітики, комунікаційні та інтеграційні модулі (CCG, PIMs), інструменти підтримки обслуговуючого персоналу з відповідною візуалізацією, отриманих даних на цифровій панелі контролю та управління енергетичною установкою.

Але, надмірна складність сучасних бортових електронних систем управління та контролю технічного стану, їх висока вартість встановлення та технічного обслуговування, потреба в спеціалізованій підготовці обслуговуючого технічного персоналу, а також обмежена доступність запасних частин і сервісних центрів створюють суттєві обмеження для їх ефективного використання, особливо на маломірних суднах. У зв'язку з цим виникає необхідність впровадження більш простих, надійних та економічно доцільних систем управління і діагностики, які забезпечують достатній рівень моніторингу та контролю технічного стану корабельних механізмів, одночасно спрощуючи обслуговування та знижуючи експлуатаційні витрати на невеликих суднах.

На даний час, для маломірних бойових та спеціалізованих самохідних морських та річкових платформ (катерів, баркасів, надувних човнів

тощо) використовуються більш прості системи управління та контролю роботи енергетичної установки з відображенням мінімально необхідних, але критично важливих параметрів роботи головних та допоміжних дизельних двигунів на цифровій бортовій панелі контролю та управління. Значення цих експлуатаційних параметрів відображують поточний технічний стан механізмів енергетичної установки в різних експлуатаційних режимах роботи.

Так, у попередніх наукових працях Боряк К.Ф., Ігнатенко О.А. [1, 15, 16] було розглянуто експрес-метод діагностування технічного стану суднових дизельних двигунів, який базується на аналізі параметрів, що відображають динаміку зміни основних робочих характеристик під час їх прогріву. Проведені дослідження показали, що використання параметрів, доступних зі штатних вимірювальних приладів бортової системи управління, дозволяє оперативно оцінювати поточний технічний стан силової установки без щоденного застосування дороговартісного складного діагностичного обладнання. Такий підхід є особливо актуальним у морських умовах експлуатації, коли рішення щодо готовності корабля до виконання завдання необхідно приймати в обмежений час.

Разом з тим, на етапі стартового прогріву дизельних двигунів існує можливість отримання додаткової діагностичної інформації про загальний технічний стан дизельного двигуна, за допомогою оцінки параметрів роботи мастильної та охолоджувальної систем. З урахуванням результатів попередніх досліджень було запропоновано новий експрес-метод діагностування заснований на аналізі двох визначальних параметрів у фіксованому часовому інтервалі від 4-ї до 11-ї хвилини роботи двигуна на режимі прогріву без навантаження. До таких параметрів було віднесено швидкість зміни тиску мастила ($\Delta P/\Delta t \leq 35$ кПа/хв) та швидкість зміни температури охолоджувальної (оборотної) води в циркуляційній системі ($\Delta T/\Delta t \leq 4,9$ °C/хв). Вимірювання зазначених величин здійснювалося через кожну хвилину протягом семи хвилин загального інтервалу часу, після чого отримані значення порівнювалися з нормованими значеннями критеріїв.

Практичне застосування запропонованого підходу передбачає фіксацію поточних показів штатних бортових вимірювальних приладів членами екіпажу, обчислення відповідних різниць у зміні параметрів та подальше формування експертного висновку щодо безпекової з технічної точки зору можливості виходу корабля в море. На підставі

отриманої інформації командир корабля приймає рішення про технічну безпеку і готовність плавзасобу до виконання поставленого завдання або, або технічну небезпеку і про потребу проведення поза регламентного технічного обслуговування чи звернення до сервісної технічної служби для позачергового проведення інструментального більш поглибленого діагностування та усунення виявлених несправностей двигуна. Однак практика експлуатації корабельно-катерного складу свідчить, що в реальних умовах підготовки катера до виходу в море виконання процедур, пов'язаних із фіксацією показів експлуатаційних параметрів, проведенням розрахунків швидкості їх зміни у ручному режимі та подальшим якісним аналізом отриманих результатів, може суттєво ускладнюватись через обмеженість часу, необхідність одночасного виконання супутніх дій із підготовки озброєння і технічних засобів до застосування, вплив умов бойової обстановки, значне штатне функціональне навантаження на екіпаж, а також вплив психоемоційних факторів.

За таких умов зростає ймовірність виникнення суб'єктивних помилок, як під час фіксації вимірюваних даних, так і виконання елементарних розрахунків та інтерпретації отриманих результатів. Це, в свою чергу, може призвести до формування недостовірних висновків щодо поточного технічного стану дизельних двигунів і, як наслідок, до прийняття необґрунтованого управлінського рішення. У зв'язку з цим актуальним науково-практичним завданням є автоматизація процесів збору, обробки та аналізу діагностичної інформації шляхом використання сучасних мобільних пристроїв з відповідним програмним забезпеченням.

Отже, метою дослідження є підвищення рівня достовірності отриманих оцінок технічного стану судових дизельних двигунів із застосуванням нового експрес-методу оперативної діагностики шляхом автоматизації та розроблення зручного програмного застосунку до наявних у екіпажу катера мобільних пристроїв. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні завдання: формалізувати алгоритм реалізації експрес-методу; розробити структуру програмного забезпечення мобільного застосунку; забезпечити автоматизовану обробку вимірюваних параметрів; а також реалізувати механізм формування діагностичного висновку для підтримки прийняття рішення командиром корабля щодо готовності судна до виходу в море.

Виклад основного матеріалу. Очевидно, що процес вимірювання поточних експлуатаційних

параметрів, їх обчислення та порівняння з нормованими критичними значеннями визначальних показників доцільно максимально автоматизувати із залученням мобільних електронних платформ, таких як планшети або смартфони. Такий підхід дозволяє суттєво прискорити процес визначення фактичного, на даний час технічного стану, знизити вплив суб'єктивного чинника, пов'язаного з діями оператора, та підвищити відтворюваність і об'єктивність результатів оперативного діагностування. З цією метою Боряк К.Ф., Ігнатенко О.А. було розроблено змістовний і логічно-послідовний алгоритм дій щодо проєктування, створення та практичного застосування програмного забезпечення, який визначає чіткий порядок реалізації експрес-методу оперативної діагностики дизельних двигунів, адаптованого до умов експлуатації швидкохідних бойових катерів з відповідною методикою вимірювання та розрахунку оцінки поточного технічного стану корабельних (суднових) дизельних двигунів із застосуванням нового експрес-методу [1].

З урахуванням сучасного рівня оснащення швидкохідних катерів штатними електронними системами керування і контролю енергетичних установок, практичне застосування експрес-методу пов'язане з його програмною реалізацією. Функціональне призначення програмного забезпечення полягає в автоматизованому зборі даних зі штатних датчиків систем змащення та охолодження, оперативному розрахунку швидкості зміни визначальних параметрів у реальному масштабі часу та порівнянні отриманих значень із нормованими критеріями технічного стану.

Для підвищення достовірності діагностичних результатів програмна реалізація експрес-методу має передбачати застосування алгоритмів фільтрації вимірювальних шумів, а також процедур усереднення значень у межах заданих часових інтервалів. Важливим елементом програмного забезпечення є візуалізація динаміки контрольованих параметрів у вигляді графіків, шкал та індикаторів стану, що забезпечує наочність процесу отримання відповідної оцінки технічного стану та спрощує інтерпретацію результатів членами екіпажу.

Таким чином, розробка програмного забезпечення для реалізації запропонованого авторами експрес-методу дозволить створити ефективний інструмент оперативної підтримки прийняття рішень щодо поточного технічного стану дизельних двигунів швидкохідних катерів. Очікується, що його ключова перевага полягатиме у використанні виключно інформації зі штатних бортових вимірювальних

приладів без залучення додаткового спеціалізованого діагностичного обладнання, що забезпечить практичну придатність, простоту впровадження та можливість застосування методу безпосередньо екіпажем на етапі підготовки судна до виходу в море.

З метою визначення послідовного та практично реалізованого порядку створення і застосування програмного забезпечення для реалізації експрес-методу оперативної діагностики дизельних двигунів, адаптованого до умов експлуатації швидкохідних бойових катерів, було розроблено узагальнений алгоритм дій, який регламентує етапи збору вхідних даних, їх оброблення, оцінювання результатів та формування експертного висновку.

1. Вхідними даними для роботи програмного забезпечення є значення параметрів, що відображаються на електронних дисплеях бортових систем керування і контролю роботи енергетичної установки. На початковому етапі дослідження ефективності впровадження нового експрес-методу можна скористатись ручним введенням вхідних числових значень самим користувачем, що дозволяє мінімізувати складність реалізації та забезпечити універсальність застосування незалежно від типу бортової апаратури. Основними числовими вхідними параметрами введення є поточні значення тиску змащувального мастила та температури охолоджувальної рідини (або різниця температур у циркуляційній системі). Зрозуміло, що в перспективі введення числових вхідних параметрів доцільно автоматизувати дровим/бездротовим шляхом взаємодії мобільного застосунку зі шатними бортовими приладами, залучивши до цього відповідно сервісну технічну службу, яка в дистанційному режимі зможе спостерігати за результатами оперативного діагностування поточного технічного стану і експлуатації двигуна і надавати кваліфікаційні поради командирів плавзасобу у прийнятті експертного рішення щодо безпечного виходу в море.

2. Процес діагностування реалізується у вигляді окремої сесії, яка ініціюється користувачем на етапі стартового режиму прогріву дизельного двигуна без навантаження. Тривалість сесії є фіксованою та відповідає фазі регулярного нагріву двигуна, у межах якої спостерігаються найбільш показові перехідні процеси в системах змащення та охолодження. Такий підхід дозволяє стандартизувати процедуру вимірювань і підвищити відтворюваність результатів.

3. У процесі роботи застосунку користувач із заданим часовим інтервалом фіксує поточні значення контрольованих параметрів. Кожне введенне значення автоматично прив'язується до моменту

часу, що забезпечує можливість подальшого аналізу їх динаміки. Усі отримані дані накопичуються у внутрішньому масиві вимірювань, який використовується для оперативних розрахунків та формування підсумкових висновків.

4. Алгоритм обробки інформації базується на аналізі швидкості зміни визначальних параметрів у часі. Після кожного нового вимірювання програмне забезпечення обчислює різницю показів параметру за відповідний часовий інтервал та визначає його інтенсивність зміни. У межах усієї сесії діагностування граничні значення динамічних показників порівнюються із нормованими критичними, які є найбільш інформативними з точки зору оцінки технічного стану систем двигуна.

5. Оцінка технічного стану здійснюється шляхом автоматизованого порівняння розрахованих динамічних параметрів із наперед заданими нормованими критичними, сформованими на основі технічної документації виробника та емпіричних даних. Результати порівняння подаються користувачеві у зрозумілому вигляді, що дозволяє швидко ідентифікувати нормальний, пограничний або потенційно аварійний стан двигуна без необхідності поглибленого аналізу числових даних.

6. Після завершення діагностичної сесії програмне забезпечення формує попередній експертний висновок щодо поточного технічного стану дизельного двигуна. Отриманий результат може бути використаний командиром катера як додатковий інформаційний аргумент при прийнятті рішення про готовність енергетичної установки до виходу в море або про необхідність залучення фахівців сервісної технічної служби для проведення більш інструментальної діагностики.

7. Інтерфейс користувача програмного забезпечення має бути максимально простим та інтуїтивно зрозумілим, що є критично важливим з огляду на умови експлуатації та обмежені часові ресурси екіпажу. Мінімізація кількості елементів візуалізації на екрані, зокрема параметрів керування та вікон для ручного введення інформації, сприяє зниженню ймовірності допущення помилок користувачем під час введення інформативних даних і, відповідно, підвищує практичну придатність застосунку.

8. З технічної точки зору доцільним є впровадження програмного забезпечення у вигляді автономного мобільного застосунку для смартфона, здатного працювати без підключення до мережі Інтернет (попередньо завантаженого застосунку у мобільний телефон відповідальним членом екіпажу корабля, щоб не було витоку будь-якої технічної інформації і координат місця знахо-

дження суб'єкта у відкритий простір через мережу мобільного зв'язку). Такий формат забезпечує мобільність, незалежність від зовнішніх сервісів та можливість використання в польових умовах. Обчислювальні алгоритми при цьому не потребують значних апаратних ресурсів, що дозволяє реалізувати застосунок на широкому спектрі сучасних мобільних пристроїв.

9. Перспективи подальшого розвитку програмного забезпечення пов'язані з автоматизацією збору даних безпосередньо з бортових систем керування, накопиченням історичних масивів експлуатаційної інформації та впровадженням адаптивних алгоритмів оцінки технічного стану. У майбутньому це дозволить розширити функціональні спроможності експрес-методу та інтегрувати його у загальну систему технічного обслуговування суднових енергетичних установок.

Таким чином, обрана конфігурація для розробки програмного забезпечення, що передбачає реалізацію алгоритмів обробки діагностичних параметрів у форматі автономного мобільного застосунку, є технічно обґрунтованою та раціональною. Запропонована алгоритмічна структура характеризується помірною обчислювальною складністю, відсутністю залежності від зовнішніх сервісів і мінімальними вимогами до апаратних ресурсів, що підтверджує доцільність її використання, як основи для створення мобільних систем оперативного діагностування.

Наступним етапом автоматизації процесу параметричної діагностики дизельних двигунів морського виконання було розроблення мобільного програмного застосунку з автономним режимом функціонування для експрес-діагностики дизельних двигунів швидкохідних катерів.

З метою вирішення зазначеної науково-прикладної задачі було розроблено програмне забезпечення «DieselDiagnostic», яке реалізує метод експрес-діагностики на основі аналізу швидкісних характеристик зміни основних експлуатаційних параметрів під час прогріву двигуна.

Програмний продукт реалізовано як багатоплатформний застосунок, здатний функціонувати на мобільних операційних системах Android та iOS, а також у веб-середовищі. Технологічною основою виступає фреймворк React Native з використанням середовища Expo SDK, що забезпечує кросплатформеність та уніфікацію програмного коду. Основною мовою реалізації обрано JavaScript стандарту ECMAScript 2020, що дозволяє застосовувати сучасні механізми модульності, асинхронної обробки даних та функціонального програмування. Такий вибір технологій обґрун-

тований необхідністю створення мобільного рішення з автономним режимом роботи та мінімальними апаратними вимогами.

Функціонально програмне забезпечення дозволяє реалізувати повний цикл проведення діагностичної процедури: ініціалізацію сесії, введення вимірювальних даних, математичну обробку результатів, класифікацію технічного стану та формування звітної документації (рис. 1). Перед початком роботи користувач здійснює створення діагностичної сесії із зазначенням ідентифікаційних даних двигуна, плавучого засобу та виконавця вимірювань.

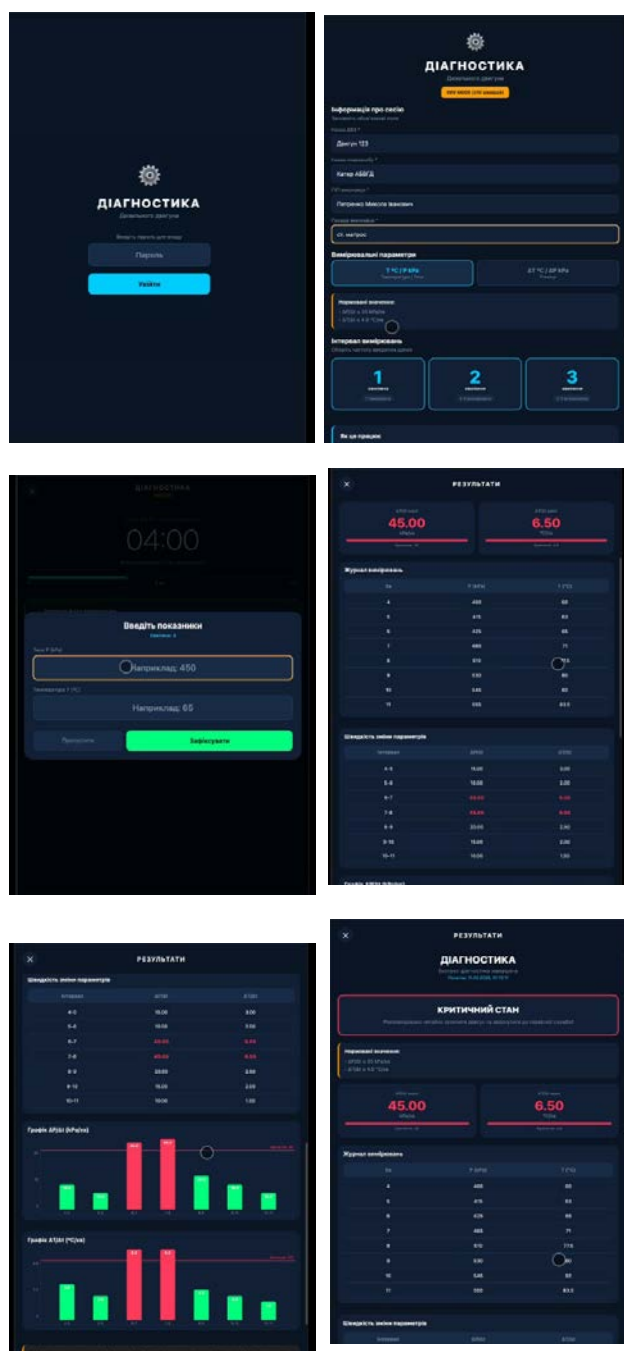


Рис. 1. Візуалізація повного циклу проведення діагностичної процедури на мобільній платформі

Додатково встановлюється інтервал між вимірюваннями та режим обробки даних (абсолютний або дельта-режим). Програмний модуль керування сесією автоматично відслідковує часові параметри прогріву двигуна та ініціює введення вимірювальних даних у визначені моменти часу. Методична основа алгоритму базується на положенні, що характер зміни температури та тиску в процесі прогріву є інформативним показником технічного стану дизельного двигуна. Для кількісної оцінки використовується швидкість зміни параметрів, яка визначається як відношення приросту величини до відповідного інтервалу часу. Часовий інтервал між двома послідовними вимірюваннями визначається виразом:

$$\Delta t = \frac{(t_i - t_{i-1}) \times k}{60}$$

де t_i та t_{i-1} – моменти часу послідовних вимірювань у секундах, k – коефіцієнт масштабування часу, що враховує програмну реалізацію таймера.

Швидкість зміни тиску у абсолютному режимі визначається за формулою:

$$\frac{\Delta P}{\Delta t} = \frac{|P_i - P_{i-1}|}{\Delta t}$$

а швидкість зміни температури відповідно:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{|T_i - T_{i-1}|}{\Delta t}$$

У дельта-режимі розрахунок здійснюється із використанням безпосередньо введених приростів параметрів

$$\frac{\Delta P}{\Delta t} = \frac{|\Delta P_i|}{\Delta t}$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{|\Delta T_i|}{\Delta t}$$

Після обчислення швидкостей для всіх інтервалів визначаються максимальні значення:

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta t}\right)_{\max} = \max\left\{\left(\frac{\Delta P}{\Delta t}\right)_1, \left(\frac{\Delta P}{\Delta t}\right)_2, \dots, \left(\frac{\Delta P}{\Delta t}\right)_n\right\}$$

$$\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)_{\max} = \max\left\{\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)_1, \left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)_2, \dots, \left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)_n\right\}$$

Отримані величини порівнюються з критичними пороговими значеннями P_{crit} і T_{crit} . Відносні коефіцієнти визначаються як:

$$R_p = \frac{(\Delta P / \Delta t)_{\max}}{P_{crit}}$$

$$R_T = \frac{(\Delta T / \Delta t)_{\max}}{T_{crit}}$$

а інтегральний показник технічного стану:

$$R_{\max} = \max(R_p, R_T)$$

Класифікація технічного стану двигуна здійснюється відповідно до умов:

$R_{\max} \geq 1.0 \Rightarrow$ стан критичний, негайно зупинити двигун, звернутися до сервісної служби;

$0.95 \leq R_{\max} < 1.0 \Rightarrow$ стан пограничний, провести детальну діагностику після повернення;

$R_{\max} < 0.95 \Rightarrow$ стан допустимий, технічний стан в нормі, експлуатація дозволена.

Запропонований підхід забезпечує двопорогову систему прийняття рішення, що дозволяє мінімізувати ймовірність хибної інтерпретації результатів та забезпечує раннє виявлення тенденцій щодо погіршення технічного стану.

Архітектурно програмне забезпечення побудовано за модульним принципом із розподілом функцій між окремими компонентами. Центральний компонент координує взаємодію підсистем керування сесією, автентифікації, аудиту та генерації звітів. Керування станом застосунку реалізовано за допомогою вбудованих механізмів React без використання додаткових бібліотек для централізованого управління даними, що спрощує архітектуру програми та робить її логіку більш зрозумілою й прозорою. Передавання необхідних функцій і даних між компонентами організовано таким чином, щоб уникнути жорсткої залежності між модулями, що полегшує розширення системи, її модифікацію та подальший супровід. Окрема увага приділена реалізації механізмів інформаційної безпеки. У системі передбачено дворівневу автентифікацію користувачів із розмежуванням прав доступу. Реалізовано механізм прогресивного блокування при багаторазових невдалих спробах входу, що базується на збільшенні інтервалу тимчасового блокування відповідно до кількості помилок. Такий підхід дозволяє підвищити стійкість системи до несанкціонованого доступу. Підсистема аудиту забезпечує фіксацію всіх значущих подій із формуванням структурованих записів у форматі JSON, що створює можливість подальшого аналізу та інтеграції з іншими інформаційними системами. Структурна схема алгоритму офлайн-діагностики наведено на структурній схемі 2.

Інтерфейс користувача спроектовано з урахуванням умов експлуатації у морському середовищі, де важливими є швидкість введення даних та наочність відображення результатів. Для підвищення ергономічності застосовано кольорову індикацію стану двигуна відповідно до рівня небезпеки, табличне представлення результатів та графічну візуалізацію динаміки зміни параметрів.

Додатковою функціональною перевагою запро-

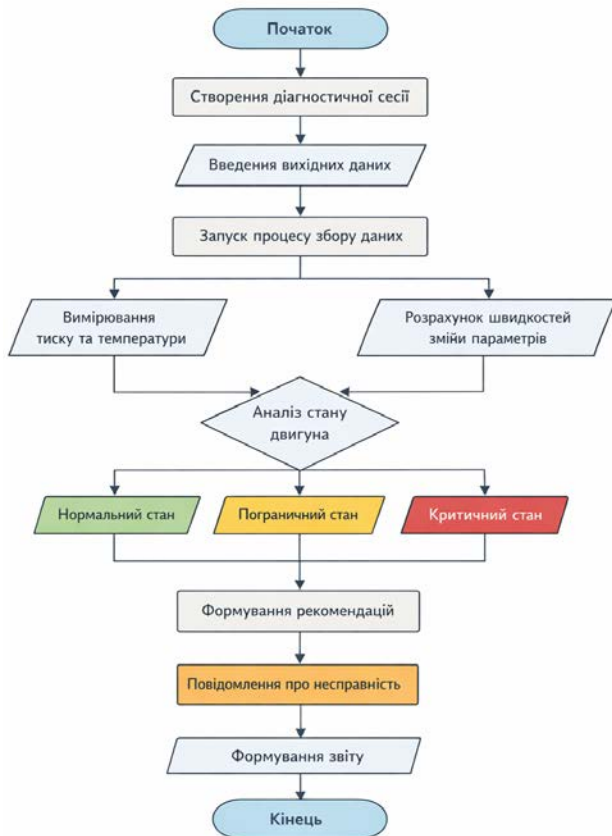


Рис. 2 Структурна схема алгоритму офлайн-діагностики дизельних двигунів швидкохідних категорій

понованого рішення є можливість формування структурованих діагностичних звітів у вигляді акту технічної діагностики, який автоматично генерується програмним застосунком у форматі PDF (рис. 3).

Структура такого документа включає ідентифікаційні та службові реквізити об'єкта діагностики (тип і номер двигуна, номер плавзасоба, дата і час проведення вимірювань, дані виконавця), узагальнений висновок щодо технічного стану двигуна, а також деталізовані результати вимірювань. У звіті систематизовано подаються основні параметри експрес-діагностики, зокрема швидкість зміни тиску мастила та швидкість зміни температури оборотної води, із порівнянням отриманих значень із критичними нормативними показниками та автоматичним формуванням попередньої оцінки їх відповідності. Окрім узагальнених показників, акт містить протокол первинних вимірювань, у якому фіксуються часові інтервали спостереження, значення тиску мастила та температури охолоджувальної рідини під час прогріву двигуна. На основі цих даних програмний застосунок автоматично виконує розрахунок швидкості зміни параметрів у визначених часових інтервалах, формуючи таблицю динаміки параметрів із відповідною якісною оцінкою (норма або відхилення). Для наочності результати додатково

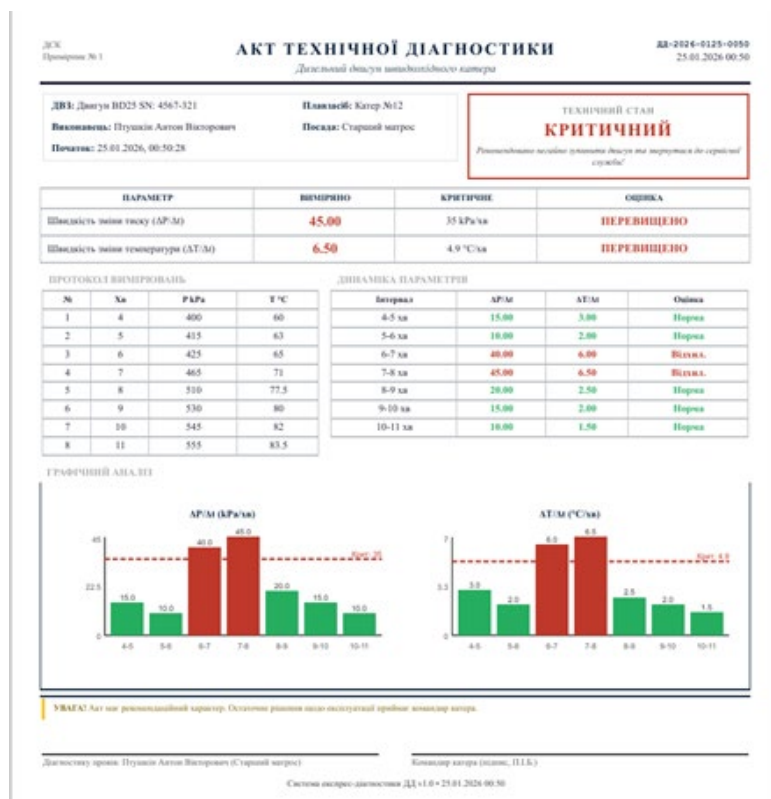


Рис. 3. Звіт щодо результатів експрес-оцінки технічного стану дизельного двигуна

подаються у вигляді графічного аналізу, що дозволяє візуалізувати динаміку зміни параметрів та оперативно ідентифікувати ділянки перевищення допустимих значень.

Формування такого структурованого документа забезпечує не лише зручність аналізу отриманих результатів, а й можливість їх подальшого архівування та документування технічного стану двигуна у конкретний момент часу. Наявність службових реквізитів, підписів відповідальних осіб та стандартизованої форми документа надає сформованим звітам юридичної та технічної значущості, що дозволяє використовувати їх як елемент службової документації під час експлуатації плавзасобу.

Крім того, автоматично сформовані акти технічної діагностики створюють додатковий інструмент контролю якості проведеного технічного обслуговування та ремонтних робіт. Порівняння результатів експрес-діагностики «до» та «після» виконання регламентних операцій дозволяє сервісним службам об'єктивно оцінювати ефективність проведених робіт з ТО (ТР, КР, КВР) та підтверджувати відновлення нормативних параметрів функціонування двигуна. Таким чином, згенеровані звіти можуть виступати джерелом додаткової аналітичної інформації для сервісних підрозділів, сприяти накопиченню статистичних даних щодо технічного стану енергетичних установок та підвищувати прозорість процесів технічного супроводу і контролю експлуатації швидкохідних катерів.

Використання мобільного програмного застосунку у форматі автономної офлайн-системи забезпечує високу мобільність і незалежність від зовнішніх мережесервісів, серверної інфраструктури та стабільності інтернет-з'єднання. Це є принципово важливим під час експлуатації плавзасобів у морських умовах, а також у підрозділах з обмеженим доступом до мережесервісів. Помірна обчислювальна складність алгоритмів обробки діагностичних параметрів дозволяє реалізувати програмний продукт на широкому спектрі стандартних мобільних пристроїв (смартфонах і планшетах) без потреби у спеціалізованому обладнанні або високопродуктивних обчислювальних системах, що значно спрощує його впровадження в експлуатаційні підрозділи ВМС ЗС України.

Наукова новизна цієї розробки полягає у створенні алгоритму експрес-оцінки технічного стану дизельного двигуна на основі аналізу максимальних швидкостей зміни параметрів під час прогріву із використанням відносних коефіцієнтів та двопорогової системи класифікації. Практична

значущість полягає у можливості використання програмного забезпечення як автономного інструменту поточної щоденної (за потребою) діагностики у польових умовах без необхідності застосування спеціалізованих стендів.

Таким чином, розроблене програмне забезпечення поєднує методи інформаційно-вимірювальної обробки даних, алгоритмічні засоби аналізу та сучасні програмні технології, що дозволяє розглядати його як ефективний інструмент підвищення надійності експлуатації дизельних двигунів швидкохідних катерів та як результат прикладного дослідження у сфері інформаційно-вимірювальних технологій.

Висновки. В результаті проведеного дослідження обґрунтовано доцільність автоматизації процесу параметричної діагностики дизельних двигунів морського виконання на основі запропонованого експрес-методу оперативної оцінки їх технічного стану. Показано, що застосування автоматизованих засобів обробки діагностичної інформації дозволяє істотно підвищити оперативність отримання результатів, зменшити вплив людського фактору під час виконання розрахунків і підвищити достовірність первинної оцінки технічного стану двигуна на етапі його підготовки до виходу в море.

Розроблений алгоритм програмної реалізації експрес-методу та створений мобільний застосунок з ручним введенням вхідних даних забезпечують автоматичну обробку інформації значень експлуатаційних параметрів, визначення швидкості їх зміни, порівняння отриманих значень із нормативними критеріями та формування попереднього діагностичного висновку. Така автоматизація суттєво спрощує використання нового експрес-методу в реальних умовах експлуатації швидкохідних катерів, де екіпаж часто має обмежену освітню підготовку за кваліфікацією інженера з діагностування технічного стану дизельних двигунів, і водночас забезпечує можливість оперативної передачі отриманих результатів фаховим спеціалістам сервісної технічної служби для подальшого аналізу та прийняття технічних рішень.

Використання мобільного програмного застосунку у форматі автономної офлайн-системи забезпечує високу мобільність і незалежність від зовнішніх мережесервісів, серверної інфраструктури та стабільності інтернет-з'єднання. Це є принципово важливим під час експлуатації плавзасобів у морських умовах, а також у підрозділах з обмеженим доступом до мережесервісів. Помірна обчислювальна складність

алгоритмів дозволяє реалізувати програмний продукт на широкому спектрі стандартних мобільних пристроїв (смартфонах і планшетах) без потреби у спеціалізованому обладнанні або високопродуктивних обчислювальних системах.

Додатковою функціональною перевагою запропонованого рішення є можливість формування структурованих діагностичних звітів. Генерація звітів реалізована у форматі PDF із включенням таблиць, графіків зміни параметрів та службових реквізитів, що забезпечує систематизацію отриманих результатів, їх подальше архівування та юридичну значущість сформованих документів. Наявність таких звітів створює додатковий інструмент контролю якості виконаних сервісними службами регламентних робіт, оскільки результати технічного стану двигуна можуть бути оперативно верифіковані після проведення технічного обслуговування або ремонту.

Крім того, сформовані діагностичні матеріали надають сервісним підрозділам додаткову інфор-

маційну базу для аналізу експлуатаційного стану двигунів, відстеження тенденцій зміни параметрів та прийняття обґрунтованих рішень щодо планування технічного обслуговування. Запропонований підхід розглядається як допоміжний інструмент оперативного збору первинної діагностичної інформації, що не замінює повноцінну інструментальну діагностику, але дозволяє своєчасно виявляти потенційні відхилення у роботі дизельних двигунів, підвищувати ефективність взаємодії екіпажу із сервісними технічними службами та попереджати можливі відмови технічних засобів.

Таким чином, впровадження автоматизованої версії нового експрес-методу діагностики сприяє підвищенню оперативності технічного контролю, удосконаленню системи моніторингу технічного стану енергетичних установок швидкохідних катерів, посиленню контролю якості сервісного обслуговування та загальному підвищенню надійності експлуатації й рівня бойової готовності корабельних технічних засобів.

Список літератури:

1. Boriak K., Ihnatenko O. Express method for predicting the development of degradation processes in ship mechanisms using current information from on-board devices. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*, Issue 2(70), 2024, pp. 131–142. DOI: <https://doi.org/10.15276/opu.2.70.2024.15>
2. International Maritime Organization. International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974/78. Chapter II-1: Construction – Structure, subdivision and stability, machinery and electrical installations. London: IMO, 2020. URL: <https://www.imorules.com/GUID-6F1047E8-4CF7-4093-8D44-B468315E3DAD.html>
3. International Maritime Organization. Guidelines for the maintenance and inspection of ship machinery and systems. London: IMO, 2019. URL: <https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/Guidelines.aspx>
4. An Introduction to NATO Standard ANEP-77 and Its Application to Naval Ships URL: <https://www.researchgate.net/publication/323478649> (дата звернення: 26.03.2026)
5. Lloyd's Register. Rules and Regulations for the Classification of Naval Ships. URL: https://www.imorules.com/NSR_V3_PT3_CH1_1.html (дата звернення: 26.03.2026)
6. Türk Loydu. Naval Ship Technology – Propulsion Plants: Rules for Classification of Naval Ships. Istanbul: Türk Loydu, 2015. URL: <https://www.turkloydu.org/en/rules>
7. Волянський С. М., Шумило О. М., Мельник О. М., Котенко О. В. Моделювання деградаційних процесів у судових дизельних двигунах на основі аналізу часових рядів. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 36(75). № 6. С. 12–20. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/36>
8. Іванов Г., Полянський П. Визначення імовірності відмов деталей судових дизельних двигунів. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science*. 2022. Т. 26, № 4. С. 62–72. DOI: [10.56407/2313-092X/2022-26\(4\)-6](https://doi.org/10.56407/2313-092X/2022-26(4)-6)
9. Zhang Y., Li H. Application of Machine Learning Techniques for Fault Diagnosis of Marine Diesel Engines. *Ocean Engineering*. 2021. Vol. 235. Article 109404. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109404>
10. Варбанець Р. А., Мінчев Д. С., Кучеренко Ю. М., Залож В. І. Параметрична діагностика судових дизельних двигунів в режимі реального часу. *Двигуни внутрішнього згоряння*. 2024. № 1. С. 72–80. DOI: [10.20998/0419-8719.2024.1.09](https://doi.org/10.20998/0419-8719.2024.1.09)
11. Рибальченко М. Є., Білоусов Є. В., Савчук В. П. Оцінка технічного стану судових двигунів внутрішнього згоряння на основі аналізу індикаторних діаграм на режимах, відмінних від номінальних. *Автоматизація судових технічних засобів*. 2022. № 2. С. 41–50. URL: <https://journals.nupp.edu.ua>
12. Самойлов О. О., Сіманенков А. Л. Технології автоматизації в обслуговуванні судових систем та впровадження predictive maintenance. *Автоматизація судових технічних засобів*. 2025. № 1. С. 5–15. URL: <https://journals.nupp.edu.ua>

13. Левінський М. В. Автоматична діагностика стану мастила суднового дизель-генератора. *Автоматизація суднових технічних засобів*: наук.-техн. зб. 2023. Вип. 28. С. 106–120. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-106-120
14. Залож В. І. Огляд сучасних тенденцій розвитку систем діагностики суднових дизельних двигунів за параметрами робочого процесу. *Розвиток транспорту*. 2024. № 1(20). С. 56–67. DOI: 10.33082/td.2024.1-20.05
15. Boriak K., Ihnatenko O. Determination of critical values of parameters for practical application of express method of diagnosing the technical state of shipboard diesel engines. *Energy Engineering and Control Systems*. 2025, vol. 11, no. 2, pp. 135–150. DOI: <https://doi.org/10.23939/jeecs2025.02.135>
16. Boriak K. F., Ihnatenko O. A. Testing a New Express Method for Prompt Evaluation of the Current Technical State of Shipboard Diesel Engines Produced by Cummins Inc. *Odesa State Academy of Technical Regulation and Quality Proceedings*. 2025. No. 2(27). P. 80–95. DOI: <https://doi.org/10.32684/2412-5288-2025-2-27-80-95>

Boriak K.F., Ihnatenko O.A. AUTOMATION OF THE PROCESS OF OPERATIVE ASSESSMENT OF THE CURRENT TECHNICAL CONDITION OF MARINE DIESEL ENGINES

The article considers the issues of automating the process of parametric diagnostics of marine diesel engines based on the latest express method of operational assessment of their technical condition during their initial preparation for going to sea. The relevance of the work is due to the fact that modern large-tonnage ships are equipped with complex on-board systems for monitoring power plants, while the use of such solutions on small-sized combat and specialized vessels is limited by the high cost of involving third-party specialists for maintenance, the complexity of operation and the need for special personnel training. As a result, simplified integrated control systems are mainly used on high-speed boats, which reflect only the basic operational parameters of diesel engines. In previous studies, the authors proposed a new express method for assessing the technical condition of diesel engines during their initial warm-up, which is based on the analysis of the rate of change in the oil pressure and the difference in the temperature of the circulating water in the circulation system during a certain time interval. At the same time, the practical implementation of the method requires manual recording of indicators and performing calculations, which, under conditions of significant time constraints during the initial engine warm-up, the presence of a subjective factor of error in the input data reduces the reliability of the calculations made on these data and, as a result, of the diagnostic conclusions. To eliminate these shortcomings, it is proposed to automate the process of diagnosing and obtaining an expert decision by developing software in the form of a special application "DieselDiagnostic" for mobile devices (smartphone or tablet) that are available to the boat crew members and that works in an autonomous mode. The software application provides input of operational parameters, automatic determination of the rate of their change, comparison with regulatory criteria and formation of a diagnostic conclusion regarding the current technical condition of the engine. The proposed solution helps to reduce the influence of the human factor, increase the efficiency of decision-making and improve the technical control of power plants of high-speed boats.

Keywords: marine diesel engines, express assessment method, current technical condition of high-speed boats, automation of the diagnostic process, application for mobile devices "DieselDiagnostic"

Дата першого надходження статті до видання: 26.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

УДК 004:37

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.1/04>**Варганова Д.О.**<https://orcid.org/0000-0002-8712-027X>

Державний університет «Житомирська політехніка»

Коломієць Р.О.<https://orcid.org/0000-0002-9020-938X>

Державний університет «Житомирська політехніка»

Окунькова О.О.<https://orcid.org/0009-0004-0093-0694>

Державний університет «Житомирська політехніка»

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ АДАПТИВНІ СИСТЕМИ НАВЧАННЯ У ПІДГОТОВЦІ МАЙБУТНІХ ІТ-ФАХІВЦІВ

У статті здійснено дослідження теоретичних та практичних засад використання інтелектуальних адаптивних систем навчання (IACH) у процесі професійної підготовки майбутніх фахівців галузі інформаційних технологій. Актуальність роботи зумовлена стрімкою цифровою трансформацією освіти та необхідністю переходу від статичних моделей навчання до динамічних середовищ, що здатні враховувати індивідуальні особливості студентів.

Проаналізовано роль штучного інтелекту (ШІ) у персоналізації освітнього процесу, де системи виступають у ролі «цифрових тьюторів», здатних імітувати діяльність викладача та надавати миттєвий зворотний зв'язок. У роботі систематизовано внесок провідних науковців у розвиток когнітивних моделей та інтелектуальних систем. Особливу увагу приділено функціонуванню адаптивних платформ на основі аналізу великих даних (Learning Analytics), що дозволяє автоматично коригувати зміст, складність та темп навчання залежно від рівня знань студента.

Дослідження включає порівняльний аналіз розвитку адаптивних технологій за період 2021-2026 років, який демонструє стрімке зростання рівня персоналізації контенту завдяки впровадженню великих мовних моделей (LLM) та ШІ-агентів. Наведено детальну класифікацію сучасних освітніх платформ (ALEKS, Khan Academy, LeetCode, Coursera та ін.) за галузями застосування та типами використовуваних AI-технологій. Доведено, що використання нейромереж для оцінювання коду та моделювання фізичних явищ значно підвищує ефективність засвоєння складних технічних дисциплін.

У висновках підкреслено, що інтелектуальні адаптивні системи забезпечують формування індивідуальних освітніх траєкторій та сприяють розвитку саморегуляції студентів. Водночас окреслено основні виклики: захист персональних даних, забезпечення якості контенту та необхідність спеціальної підготовки викладачів до роботи в новому цифровому середовищі.

Ключові слова: адаптивне навчання, штучний інтелект, ІТ-освіта, персоналізація, цифрові технології, інтелектуальні системи навчання, Learning Analytics.

Постановка проблеми. Сучасна система освіти перебуває у стані активної цифрової трансформації, що зумовлює необхідність впровадження новітніх технологій у навчальний процес. Особливого значення набувають інтелектуальні адаптивні системи навчання, які дозволяють індивідуалізувати освітній процес та підвищити його ефективність.

У традиційній моделі навчання всі студенти отримують однаковий матеріал, що не враховує їх індивідуальні особливості. Це призводить до зни-

ження мотивації та ефективності навчання. Водночас адаптивні системи дозволяють створювати персоналізовані траєкторії навчання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Актуальність адаптивного навчання зростає, що підтверджується інтенсивним інтересом дослідників та розробників платформ, призначених для його реалізації [10; 11; 14].

Проблематика адаптивного навчання активно досліджується у сучасній педагогіці та інформаційних технологіях. Значний внесок зробили

дослідники у галузі інтелектуальних навчальних систем, які довели ефективність використання AI. Найвідомішими з них: Андрущенко В.П., Васянович Г.П., Зязюн І.А., Кремень В.Г., Бондар В.І., Гончаренко С.У., Гуревич Р.С., Крутецький В.А., Мітіна Л.М., Виготський Л.С., Костюк Г.С., Брушлинський А.В., Опалюк Т.Л., Максименко С.Д., Рубінштейн С.Л. [13].

Значний внесок у розвиток інтелектуальних навчальних систем зробили провідні зарубіжні дослідники. Зокрема, Беверлі Парк Вулф (Beverly Park Woolf) є однією з ключових фігур у галузі інтелектуальних навчальних систем. У своїх роботах вона обґрунтувала ефективність адаптивного навчання та створення інтелектуальних тьюторів, здатних підлаштовуватися під потреби здобувача освіти [1]. Вагомий внесок здійснив Курт ВанЛен (Kurt VanLehn), який розробив концепцію когнітивних тьюторів. Його дослідження показали, що системи штучного інтелекту можуть ефективно імітувати діяльність викладача та значно покращувати результати навчання [2]. Основи моделювання навчальної діяльності були закладені Джон Р. Андерсон (John R. Anderson), який створив когнітивну теорію ACT-R. Ця теорія стала фундаментом для розробки багатьох сучасних інтелектуальних навчальних систем і дозволяє моделювати процеси засвоєння знань людиною [3; 4]. Важливу роль відіграла команда дослідників Карнегі Лернінг (Carnegie Learning), яка створила інтелектуальні системи навчання математики. Практичне впровадження цих систем продемонструвало підвищення успішності, що підтверджує ефективність використання AI в освіті. Суттєвий внесок у розвиток аналізу навчальних даних зробив Раян Бейкер (Ryan Baker), його роботи доводять важливість персоналізації навчання на основі даних [9].

Практичні рішення у сфері адаптивного навчання запропонував Ніл Хеффернан (Neil Heffernan), який створив платформу ASSISTments. Його дослідження підтверджують ефективність використання онлайн-тестування з адаптивною логікою. У галузі аналітики навчання важливий внесок зробив Драган Гашевич (Dragan Gasevic), який обґрунтував значення аналізу великих обсягів освітніх даних для підвищення якості навчання. Теоретичні засади сучасного цифрового навчання розвинув Джордж Сіменс (George Siemens), автор теорії коннективізму (Connectivis), який пояснює навчання в умовах цифрового середовища. Значний внесок у розвиток адаптивних онлайн-курсів зробила Кендіс Тіллі (Candace Thille). Її дослідження доводять, що використання інтелек-

туальних технологій сприяє покращенню результатів навчання [10].

Роботи зазначених дослідників підтверджують, що застосування штучного інтелекту в освіті забезпечує персоналізацію навчання, підвищення ефективності засвоєння матеріалу та формування індивідуальних освітніх траєкторій.

Постановка завдання. Сучасна підготовка IT-фахівців вимагає переходу від традиційних статичних моделей навчання до динамічних освітніх середовищ, здатних адаптуватися до швидких змін технологій та враховувати індивідуальні особливості студентів. У сучасних умовах цифровізації та глобальної конкуренції на ринку праці здобуття високого рівня інформаційно-дослідницьких компетентностей стає ключовим фактором успішної професійної підготовки майбутніх IT-спеціалістів.

Основною метою даного дослідження є аналіз, обґрунтування та визначення можливостей використання сучасних високотехнологічних освітніх платформ із елементами штучного інтелекту для створення умов формування компетентностей майбутніх IT-фахівців. У цьому контексті особливу увагу приділено вивченню адаптивних навчальних технологій, які забезпечують персоналізацію освітнього процесу, автоматизовану підтримку навчання та оперативне оцінювання результатів студентів.

До завдань дослідження входять:

1. Провести системний аналіз сучасних адаптивних навчальних платформ та визначити їх функціональні можливості у сфері IT та природничо-математичної освіти.
2. Оцінити вплив інноваційних адаптивних технологій на якість навчального процесу та ефективність формування ключових компетентностей студентів.
3. Виявити виклики та обмеження, що виникають при використанні даних платформ у навчальному середовищі, зокрема пов'язані з інтеграцією штучного інтелекту та обробкою великих даних про навчальні результати.
4. Сформулювати рекомендації щодо подальшого розвитку адаптивних освітніх систем та напрямів їх використання для підвищення ефективності підготовки IT-фахівців.

Дослідження сучасних адаптивних навчальних платформ спрямоване на створення динамічного та персоналізованого освітнього середовища, що відповідає актуальним вимогам IT-галузі та сприяє ефективному формуванню інформаційно-дослідницьких компетентностей студентів.

Виклад основного матеріалу. У підготовці майбутніх ІТ-фахівців інтелектуальні адаптивні системи мають особливе значення. Галузь інформаційних технологій характеризується швидкою зміною знань і високими вимогами до практичних навичок. Адаптивні платформи дозволяють автоматично підбирати завдання відповідно до рівня підготовки студента: від базових вправ до складних проєктних задач. Наприклад, при вивченні програмування система може аналізувати код студента, виявляти помилки та пропонувати індивідуальні рекомендації щодо їх усунення [7; 8; 9].

Основу інтелектуальних адаптивних систем становить використання методів штучного інтелекту, які дозволяють аналізувати навчальну діяльність здобувачів освіти, визначати рівень їхніх знань, умінь і навичок та відповідно до цього змінювати зміст, складність і темп навчання. Такі системи функціонують на основі збору та обробки великих обсягів даних про користувача, включаючи результати тестування, швидкість виконання завдань, типові помилки та поведінкові особливості.

Важливою складовою адаптивного навчання є персоналізація освітнього процесу. На відміну від традиційних підходів, де всі студенти навчаються за однаковою програмою, адаптивні системи формують індивідуальні освітні траєкторії.

Це дозволяє більш ефективно враховувати рівень підготовки кожного студента, його стиль навчання та когнітивні особливості. Теоретичним підґрунтям такого підходу є ідеї Лев Виготський про зону найближчого розвитку, відповідно до яких навчання має випереджати розвиток і сприяти його активізації [11].

Крім того, важливим елементом є використання аналітики навчальних даних (Learning Analytics), що дозволяє викладачам отримувати об'єктивну інформацію про навчальний прогрес студентів [13]. Це дає змогу своєчасно виявляти труднощі в навчанні, коригувати освітній процес та підвищувати його ефективність.

Використання інтелектуальних адаптивних систем також сприяє розвитку самостійності студентів. Завдяки інтерактивному середовищу, миттєвому зворотному зв'язку та можливості працювати у власному темпі, здобувачі освіти набувають навичок саморегуляції та критичного мислення. Це особливо важливо для ІТ-фахівців, які повинні постійно оновлювати свої знання упродовж професійної діяльності [14].

Проведено дослідження і здійснено аналіз сучасних адаптивних навчальних систем за 5 років, що дозволяє оцінити актуальні тенденції розвитку технологій штучного інтелекту в освіті та їх вплив на ефективність навчального процесу.

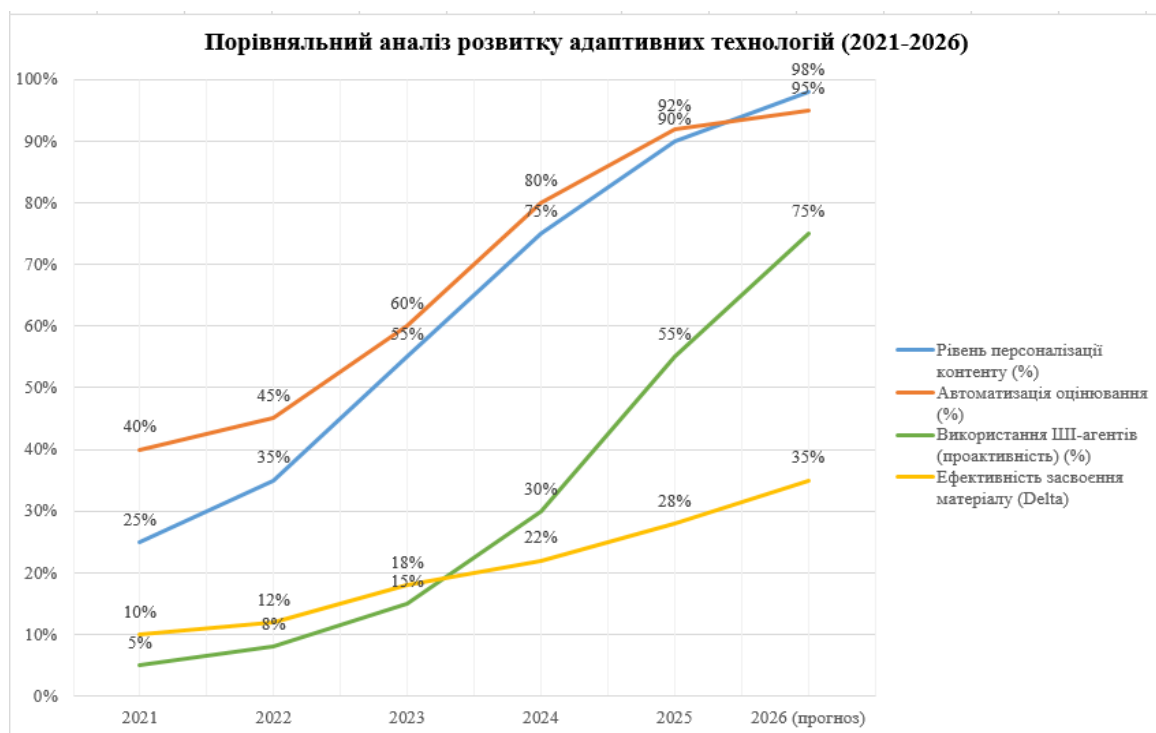


Рис. 1. Порівняльний аналіз розвитку адаптивних технологій (2021-2026). (Значення наведені у відсотках (%) відносно загального ринку освітніх технологій і рівня засвоєння функцій)

Аналіз показників:

1. Рівень персоналізації: Стрімкий стрибок у 2023-2024 роках пов'язаний із інтеграцією LLM (великих мовних моделей), які дозволили створювати індивідуальні пояснення.

2. Автоматизація оцінювання: Показує стабільне зростання. Якщо у 2021 році це були переважно тести, то у 2026 році ШІ аналізує есе, відкриті відповіді та навіть творчі проекти з високою точністю.

3. Використання ШІ-агентів: Найбільш динамічний показник. Це перехід від «системи, яка чекає запиту» до «системи, яка веде за собою», виступаючи повноцінним цифровим тьютором.

4. Показник «Ефективність засвоєння» (Delta) вказує на те, наскільки швидше або якісніше студенти опановують програму порівняно з контрольною групою без адаптивних систем. Як бачимо, у 2026 році ШІ дозволяє засвоювати матеріал на третину ефективніше [12].

Здійснивши аналіз сучасних технологій адаптивного навчання слід виділити системи навчання, що забезпечують персоналізацію освітнього процесу та підвищують його ефективності.

1. Нейромережі для оцінювання коду. Використання моделей штучного інтелекту дозволяє автоматично аналізувати програмний код студентів, виявляти помилки та надавати рекомендації щодо їх виправлення.

2. Нейромережі для моделювання фізичних явищ. Застосування нейромереж дає змогу моделювати фізичні процеси та створювати інтерактивні лабораторії.

3. Аналіз математичних закономірностей. Алгоритми машинного навчання використовуються для виявлення прогалин у знаннях та підбору індивідуальних завдань.

4. Learning Analytics. Аналіз навчальних даних дозволяє оцінити прогрес студентів і прогнозувати їх результати.

5. Адаптивні алгоритми. Системи змінюють рівень складності завдань залежно від результатів навчання.

6. Рекомендаційні системи. AI підбирає навчальні матеріали та формує індивідуальну траєкторію навчання.

7. NLP для пояснення матеріалу. Мовні моделі дозволяють генерувати пояснення та відповідати на запитання студентів.

8. Гейміфікація. Ігрові елементи підвищують мотивацію та залученість студентів.

9. Автоматичні системи тестування. Адаптивні тести дозволяють ефективно оцінювати знання.

10. Хмарні технології. Забезпечують доступ до навчальних ресурсів з будь-якого пристрою [15].

Вивчення дисциплін природничо-математичного та IT-напрямів на вищому навчальному закладі залишаються одними з найскладніших для студентів. Це зумовлено високим рівнем абстрактності навчального матеріалу, необхідністю розвитку логічного та алгоритмічного мислення, а також значним обсягом практичних завдань.

Зокрема, вивчення програмування потребує глибокого розуміння алгоритмів, структур даних та принципів побудови програмних систем. Математика і фізика, у свою чергу, вимагають сформованих аналітичних здібностей, умінь працювати з формальними моделями та розв'язувати складні задачі. Дисципліни у сфері інформаційних технологій поєднують у собі як теоретичні, так і практичні компоненти, що підвищує складність їх засвоєння. У зв'язку з цим адаптивні технології стають актуальними і дозволяють індивідуалізувати навчання, враховуючи рівень підготовки кожного студента, темп засвоєння матеріалу та його когнітивні особливості [9; 10].

У даній таблиці представлено порівняльний аналіз сучасних адаптивних навчальних платформ, що застосовуються у вивченні дисциплін природничо-математичного та IT-напрямів. Більшість із наведених систем (наприклад, Khan Academy, Desmos, WolframAlpha) реалізують механізми автоматичного аналізу знань користувача, адаптації складності завдань та надання миттєвого зворотного зв'язку. Найвищий рівень адаптивності демонструють платформи, орієнтовані на персоналізацію навчання та автоматичний аналіз результатів студентів. Особливо ефективними є системи для вивчення програмування, які забезпечують автоматичну перевірку коду та адаптацію складності завдань [8].

Висновки. Інтелектуальні адаптивні системи навчання є ефективним інструментом підготовки майбутніх IT-фахівців. Їх впровадження дозволяє значно підвищити якість підготовки, забезпечує персоналізацію навчання, підвищують його результативність, сприяє розвитку ключових компетентностей майбутнього фахівця.

Адаптивні системи навчання здатні автоматично аналізувати результати навчальної діяльності студентів, виявляти прогалини у знаннях та пропонувати відповідні навчальні матеріали і завдання. Це забезпечує більш ефективне засвоєння складних тем, зменшує рівень навчальних труднощів та підвищує мотивацію до навчання.

Крім того, використання технологій штучного

Порівняльний аналіз адаптивних навчальних платформ

Освітня платформа	Галузь застосування	Технології адаптивного навчання	AI-технології	Педагогічна ефективність
ALEKS	Математика	Адаптивне тестування	Machine Learning	Виявлення прогалин у знаннях
Khan Academy	Математика, фізика	Персоналізація навчання	Learning Analytics	Індивідуальний темп
DreamBox	Математика	Динамічна адаптація	AI алгоритми	Розвиток логіки
Carnegie Learning	Математика	Когнітивні тьютори	Cognitive AI	Глибоке розуміння
Desmos	Математика	Візуалізація графіків	Data Visualization	Краще розуміння функцій
WolframAlpha	Математика, фізика	Обчислювальний аналіз	AI engine	Детальні пояснення
PhET Simulations	Фізика	Інтерактивні симуляції	Modeling	Візуалізація процесів
Stellarium	Астрономія	Візуалізація	Simulation	Наочність
Quizlet	Теорія	Адаптивне повторення	AI repetition	Запам'ятовування
Codeforces	Програмування	Адаптивні задачі за рейтингом	Data Analytics	Алгоритмічне мислення
LeetCode	Програмування	Персоналізовані задачі	ML	Підготовка до співбесід
HackerRank	Програмування	Автоматична перевірка	AI evaluation	Практичні навички
Codewars	Програмування	Рівні складності	Gamification	Мотивація
freeCodeCamp	Веб-розробка	Покрокове навчання	Analytics	Практика
Coursera	IT, Data Science	Персоналізація курсів	Recommender systems	Академічний рівень
edX	IT	Адаптивні курси	AI analytics	Курси університетів
Udemy	IT	Рекомендації	Recommendation AI	Гнучкість
Stepik	Програмування	Автоперевірка коду	Auto-check AI	Інтерактивність
GitHub	IT	Аналіз коду	AI tools	Реальні проекти

інтелекту сприяє формуванню індивідуальних освітніх траєкторій, що є особливо важливим у підготовці майбутніх IT-фахівців. Завдяки адаптивному підходу студенти отримують можливість працювати у власному темпі, отримувати миттєвий зворотний зв'язок та поступово підвищувати рівень складності навчальних завдань.

Водночас впровадження таких систем супроводжується певними викликами. Серед них – необхідність забезпечення якості навчального контенту, захист персональних даних користувачів,

а також підготовка викладачів до використання нових технологій. Важливим є також питання інтеграції адаптивних систем у традиційний освітній процес та забезпечення їх методичної підтримки.

Таким чином, попри складність дисциплін технічного спрямування, інтеграція адаптивних технологій на основі штучного інтелекту сприяє підвищенню ефективності навчального процесу, покращенню рівня знань студентів та забезпеченню високої якості підготовки IT-спеціалістів.

Список літератури:

1. Woolf B. P. Building Intelligent Interactive Tutors: Student-Centered Strategies for Revolutionizing E-Learning. Burlington: Morgan Kaufmann, 2008. 466 p.
2. VanLehn K. The Relative Effectiveness of Human Tutoring, Intelligent Tutoring Systems, and Other Tutoring Systems. *Educational Psychologist*. 2011. Vol. 46(4). Pp. 197-221.
3. Anderson J. R., Corbett A. T. Knowledge tracing: Modeling the acquisition of procedural knowledge. *User Modeling and User-Adapted Interaction*. 1994. Vol. 4. Pp. 253-278.
4. Koedinger K. R., Anderson J. R., Hadley W. H., Mark M. A. Intelligent tutoring goes to school in the big city. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*. 1997. Vol. 8. Pp. 30-43.
5. Fernández-Herrero J. Evaluating Recent Advances in Affective Intelligent Tutoring Systems: A Scoping Review of Educational Impacts and Future Prospects. *Education Sciences*. 2024. Vol. 14(8). Article 839. <https://doi.org/10.3390/educsci14080839>
6. Liu S., Guo X., Hu X., Zhao X. Advancing Generative Intelligent Tutoring Systems with GPT-4: Design, Evaluation, and a Modular Framework for Future Learning Platforms. *Electronics*. 2024. Vol. 13(24). Article 4876. <https://doi.org/10.3390/electronics13244876>
7. Kouam A. W. F. The effectiveness of intelligent tutoring systems in supporting students with varying levels of programming experience. *Discover Education*. 2024. Vol. 3. Article 278. <https://doi.org/10.1007/s44217-024-00385-3>

8. Kerimbayev N., Adamova K., Shadiev R., Altinay Z. Intelligent educational technologies in individual learning: a systematic literature review. *Smart Learning Environments*. 2025. Vol. 12. Article 1. <https://doi.org/10.1186/s40561-024-00360-3>
9. Lai C.-H., Lin C.-Y. Analysis of Learning Behaviors and Outcomes for Students with Different Knowledge Levels: A Case Study of Intelligent Tutoring System for Coding and Learning (ITS-CAL). *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15(4). Article 1922. <https://doi.org/10.3390/app15041922>
10. Rodrigues B., Pinto R., Gonçalves G. A Systematic Literature Review of AI-Driven Intelligent Tutoring Systems in Engineering Education: Emphasizing Personalization, Feedback, and Student Monitoring. *IEEE Access*. 2025. Pp. 1-15. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3626473>
11. Zhumashev M., Barlybayev A., Kintonova A., Sabitov A., Kudubayeva S. A systematic review (2010–2024) of smart textbooks and intelligent tutoring systems: Models, methods, subjects, and geographies. *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies*. 2025. Vol. 8(6). Pp. 1950-1963. <https://doi.org/10.53894/ijirss.v8i6.10048>
12. Liu V., Latif E., Zhai X. Advancing Education through Tutoring Systems: A Systematic Literature Review. *arXiv preprint*. 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.09748>
13. Москалюк М. М., Москалюк Н. В., Лень А. В. Штучний інтелект в закладах вищої освіти: переваги та недоліки. *Open Educational E-Environment of Modern University*. 2023. № 15. С. 85-96. <https://doi.org/10.28925/2414-0325.2023.157>
14. Певень К., Хміль Н., Макогончук Н. Вплив штучного інтелекту на зміну традиційних моделей навчання та викладання: аналіз технологій для забезпечення ефективності індивідуальної освіти. *Перспективи та інновації науки*. 2023. № 11(29). С. 306-316. [https://doi.org/10.52058/2786-4952-2023-11\(29\)-306-316](https://doi.org/10.52058/2786-4952-2023-11(29)-306-316)
15. Сікора Я. Б., Марчук Н. А., Нестеров В. Ф. Технології майбутнього: роль штучного інтелекту у персоналізованому навчанні. *Наука і техніка сьогодні*. 2024. № 1(29). С. 526-537. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-1\(29\)-526-537](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-1(29)-526-537)

Varhanova D.O., Kolomiiets R.O., Okunkova O.O. INTELLIGENT ADAPTIVE LEARNING SYSTEMS IN THE TRAINING OF FUTURE IT SPECIALISTS

The article investigates the theoretical and practical foundations of using intelligent adaptive learning systems (IALS) in the professional training of future information technology specialists. The relevance of the work is driven by the rapid digital transformation of education and the need to transition from static learning models to dynamic environments capable of considering students' individual characteristics.

The role of artificial intelligence (AI) in personalizing the educational process is analyzed, where systems act as "digital tutors" capable of mimicking instructor activities and providing instant feedback. The paper systematizes the contributions of leading scientists to the development of cognitive models and intelligent systems. Particular attention is paid to the functioning of adaptive platforms based on learning analytics (Learning Analytics), which allows for the automatic adjustment of content, complexity, and learning pace depending on the student's knowledge level.

The study includes a comparative analysis of the development of adaptive technologies for the period 2021–2026, demonstrating a rapid increase in the level of content personalization due to the implementation of large language models (LLMs) and AI agents. A detailed classification of modern educational platforms (ALEKS, Khan Academy, LeetCode, Coursera, etc.) is provided by application areas and types of AI technologies used. It is proven that the use of neural networks for code evaluation and modeling of physical phenomena significantly increases the effectiveness of mastering complex technical disciplines.

The conclusions emphasize that intelligent adaptive systems ensure the formation of individual educational trajectories and promote the development of students' self-regulation. At the same time, key challenges are outlined: personal data protection, ensuring content quality, and the need for special training for instructors to work in the new digital environment.

Keywords: adaptive learning, artificial intelligence, IT education, personalization, digital technologies, intelligent learning systems, Learning Analytics.

Дата першого надходження статті до видання: 27.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Волков Д.В.<https://orcid.org/0009-0006-0933-616X>

Національний університет «Одеська політехніка»

Любченко В.В.<https://orcid.org/0000-0002-4611-7832>

Національний університет «Одеська політехніка»

ФОРМАЛЬНА МОДЕЛЬ ЗАГРОЗ БЕЗПЕКИ МІКРОСЕРВІСНИХ ЗАСТОСУНКІВ НА ОСНОВІ ЛОГІКИ ПЕРШОГО ПОРЯДКУ

У статті досліджуються підходи до аналізу безпеки мікросервісних програмних систем на основі формальних методів моделювання та перевірки властивостей. Актуальність роботи зумовлена широким використанням мікросервісної архітектури у хмарних застосунках, де програмні системи складаються з великої кількості автономних сервісів, розгорнутих у контейнерному середовищі та керованих оркестраторами. Попри значні переваги у масштабованості та гнучкості, така архітектура суттєво ускладнює забезпечення безпеки, оскільки кожен сервіс, міжсервісна взаємодія або контейнерний образ можуть виступати потенційним вектором атаки. Традиційні підходи до моделювання загроз, розроблені для монолітних або клієнт-серверних систем, не забезпечують достатнього рівня формалізації та значною мірою залежать від експертних оцінок аналітиків.

Метою роботи є дослідження можливостей застосування формальних моделей для системного аналізу архітектури мікросервісних систем і виявлення потенційних загроз безпеці на ранніх етапах розроблення. У роботі запропоновано підхід до представлення мікросервісної архітектури у вигляді формальної моделі, що відображає сервіси, їхні взаємодії, політики доступу та мережеві зв'язки. На основі цієї моделі застосовуються методи формальної верифікації, зокрема *model checking*, для автоматизованої перевірки виконання визначених властивостей безпеки.

Запропонований підхід дозволяє формалізувати процес моделювання загроз, зменшити залежність від суб'єктивних оцінок експертів та забезпечити можливість автоматизованого аналізу складних розподілених систем. У статті також розглянуто особливості інтеграції запропонованих методів у сучасні процеси розроблення програмного забезпечення, зокрема в середовищах контейнеризації та оркестрації сервісів. Отримані результати демонструють перспективність використання формальних методів для підвищення рівня безпеки мікросервісних систем та можуть бути використані під час проєктування і аналізу архітектури сучасних хмарних застосунків.

Ключові слова: програмна інженерія, мікросервісна архітектура, моделювання загроз, безпека програмних систем, формальні моделі систем.

Постановка проблеми. Мікросервісна архітектура стала домінуючою парадигмою побудови хмарних застосунків. Системи, що складаються з десятків і сотень автономних сервісів, розгорнутих у контейнерах і керованих оркестраторами на кшталт Kubernetes, сьогодні є нормою як у великих технологічних компаніях, так і у фінансовому та державному секторах. Разом із масштабованістю та гнучкістю така архітектура приносить якісно нову поверхню атаки: кожен сервіс, кожне міжсервісне з'єднання, кожен секрет і кожен образ контейнера є потенційними векторами компрометації.

Традиційні методи моделювання загроз були розроблені в епоху монолітних або клієнт-серверних систем і несуть у собі фундаментальні обмеження, що стають критичними в мікросервісному контексті. По-перше, вони є евристичними: результат моделювання залежить від досвіду та суб'єктивних суджень аналітика, а не від формально верифікованих властивостей системи. По-друге, вони погано масштабуються: ручний аналіз діаграм потоків даних для системи з двохсот сервісів є практично нездійсненним без суттєвої автоматизації. По-третє, і це найбільш принципово, вони не розрізняють два якісно різні стани: властивість

безпеки порушена та даних недостатньо для висновку. З точки зору управління ризиками це є неприпустимим спрощенням: відсутність свідчень не є свідченням відсутності загрози.

Формальні методи давно зарекомендували себе у суміжних галузях. Верифікація криптографічних протоколів за допомогою ProVerif та Tamarin Prover дозволяє доводити властивості безпеки з математичною строгістю. Формальна верифікація апаратного забезпечення та операційних систем стала стандартом у критичних застосуваннях. Проте на архітектурному рівні мікросервісних систем формальні підходи залишаються практично нерозробленими. Існуючі інструменти виконують перевірку окремих артефактів за наборами правил, але не будують цілісної формальної моделі системи, над якою можна міркувати дедуктивно.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних дослідженнях безпеки мікросервісних систем активно застосовуються формальні методи для верифікації архітектурних рішень і політик доступу ще на етапі проектування.

У роботі Шнайдера (Schneider) та ін. [1] правила безпеки формалізуються як запити до моделей потоків даних, а результати перевірки подаються у вигляді пояснюваних трас, що пов'язують висновки з елементами моделі та артефактами коду, підтримуючи аудит і сертифікацію. У дослідженні Чондамронгкула (Chondamrongkul) та ін. [2] поєднано онтологію безпеки та model checking: формується семантична модель архітектури, на основі онтологічного виведення визначаються загрози, після чого перевіряється виконання властивостей безпеки до розгортання системи.

У статті Войтака (Wojtak) та ін. [3] вихідний код мікросервісів реконструюється у формальну модель, для якої генеруються SMT-обмеження, що відображають архітектурні та безпекові правила; перевірка здійснюється за допомогою SMT-розв'язувачів із можливістю синтезу мінімальних змін для відновлення відповідності. У статті Войтака (Wojtak) [4] політики авторизації автоматично вилучаються з коду та кодуються у формальну модель, що дозволяє перевіряти їх узгодженість і виявляти порушення властивостей контролю доступу.

Робота Руланда (Rouland) та ін. [5] пропонує модельно-керований підхід із використанням логіки першого порядку, модальної логіки та Alloy для формалізації архітектур і вразливостей; перевірка здійснюється через аналіз порушень формул, а вимоги організовано у повторно використовувані бібліотеки моделей. У роботі

Яндера (Jander) та ін. [6] представлено рольову архітектуру автентифікації з криптографічною прив'язкою ролей до мікросервісних каналів; хоча model checking не застосовується, безпека обґрунтовується формальними криптографічними примітивами та властивостями.

У роботі Венчкаускаса (Venčkauskas) та ін. [7] запропоновано архітектуру контролю доступу з зовнішньою автентифікацією та внутрішньою авторизацією на основі розширеного RBAC і токенів; модель описує ролі, токени й межі довіри та обґрунтовує принцип найменших привілеїв. Емпіричне дослідження Резаєї Насаба (Rezaei Nasab) та ін. [8] узагальнює практики безпеки в індустрії та підкреслює релевантність онтологічного виведення й model checking для реальних мікросервісних проєктів.

Загалом ці роботи демонструють системну інтеграцію формальних методів у проектування мікросервісних архітектур, що забезпечує раннє виявлення порушень, підвищення прозорості аргументації та більш надійну перевірку безпеки розподілених систем.

Проте існуючі формальні підходи до безпеки здебільшого зосереджені або на верифікації протоколів, або на статичному аналізі коду. Формальних моделей для архітектурного рівня мікросервісів майже немає.

Постановка завдання. Метою цієї роботи є представлення мікросервісного застосунку як $\mathcal{L}$ -структури логіки першого порядку, тобто математичного об'єкта, який об'єднує типізовані універсуми сутностей (сервіси, контейнери, ідентичності, сертифікати, політики тощо), функції атрибутів та відношення між ними. Така модель дозволить визначити загрози за допомогою верифікованих формул над цією структурою, що зведе задачу перевірки безпеки системи до задачі виконаності формули.

Для досягнення мети в роботі розв'язано три задачі, а саме:

- 1) формально визначено $\mathcal{L}$ -структуру мікросервісного застосунку;
- 2) введено формальне визначення загрози як верифікованого об'єкта з тричастинною семантикою та двома шаблонами специфікації;
- 3) доведено відповідність між категоріями загроз STRIDE та класами формул першого порядку.

Виклад основного матеріалу. Формальне представлення мікросервісного застосунку визначається як структурований математичний об'єкт, що інтегрує п'ять компонентів: множину розгля-

нутих середовищ, типізовані універсуми сутностей, функції атрибутів, відношення між сутностями та шар обмежень коректності. Формально, модель застосунку вводиться як $\mathcal{L}$ -структура:

$$\mathcal{A} = (ENV^{\mathcal{A}}, \{T^{\mathcal{A}}\}_{T \in \mathcal{T}}, \{Present_T^{\mathcal{A}}\}_{T \in \mathcal{T}}, \{a^{\mathcal{A}}\}_{a \in A_{core}}, \{R^{\mathcal{A}}\}_{R \in R_{core}}),$$

де $ENV^{\mathcal{A}}$ – множина середовищ (наприклад, dev/stage/prod), кожне $T^{\mathcal{A}}$ – множина сутностей відповідного типу, $Present_T^{\mathcal{A}} \subseteq T^{\mathcal{A}} \times ENV^{\mathcal{A}}$ – предикат присутності сутності в середовищі, $\{a^{\mathcal{A}}\}$ – інтерпретації функцій атрибутів, $\{R^{\mathcal{A}}\}$ – інтерпретації відношень між сутностями.

Представлення є допустимим тоді і тільки тоді, коли воно задовольняє теорію правильності формування:

$$\mathcal{A} \models \Omega_{WF}.$$

Ця умова гарантує, як мінімум, що факти, індексовані за середовищем, правильно обмежені за областю видимості, обов'язкові атрибути присутні, коли сутність наявна, ідентифікатори/ключі є унікальними там, де це вимагається, а з'єднання між сутностями не породжують неприв'язаних посилань.

Щоб уникнути повторень і зберегти наративну зв'язність, формальне представлення мікросервісного застосунку специфікується за допомогою (i) фіксованої колекції множин носіїв для типів сутностей, (ii) спільної бібліотеки доменів, що використовуються як кодомени функцій атрибутів, та (iii) невеликої кількості допоміжних предикатів, що підтримують міркування в рамках середовища та базову синтаксичну класифікацію. Ці елементи складають багаторазово використовуваний математичний словник, на який рівномірно посилаються у всіх специфічних для сутностей визначеннях (атрибути, відношення та обмеження коректності).

Для кожного типу сутності T визначається скінченна множина атрибутів $Attr(T)$. Кожен атрибут $a \in Attr(T)$ характеризується шістьма полями: тип власника, ім'я, режим індексування, вид значення (кардинальність), кодомени та клас вимоги.

Режим індексування є ключовим параметром. Атрибут є індексованим за середовищем (за замовчуванням), якщо відповідний факт може змінюватися між середовищами, або глобальним (виключення), якщо факт є незмінним у рамках припущень моделювання.

Щоб розрізнити «невідомі/відсутні дані» від «явних негативних значень», шаблон вводить предикат визначеності для кожного атрибута a . Для атрибутів, індексованих за середовищем:

$$Present_a(t, e) \Leftrightarrow a_T(t, e) \downarrow.$$

Для глобальних атрибутів:

$$Present_T(t) \Leftrightarrow a_T(t) \downarrow.$$

Цей предикат є канонічним механізмом для вираження доступності свідчень і систематично використовується в обмеженнях коректності формування та (необов'язково) в управлінні повнотою/впевненістю. Важливо, що $Present_a$ відрізняється від $Present_T$: сутність може бути присутня в середовищі навіть тоді, коли деякі її обов'язкові атрибути невизначені.

Позначимо глобальну множину обмежень коректності формування як Ω_{WF} і визначимо її як об'єднання специфічних для сутностей фрагментів:

$$\Omega_{WF} = \bigcup_{T \in \mathcal{T}} \Omega_T,$$

де $\mathcal{T}$ – множина типів сутностей, включених до формального словника.

Визначимо тепер уніфіковану схему обмежень.

1. Область видимості фактів, індексованих за середовищем. Атрибути, індексовані за середовищем, можуть бути заявлені лише для середовищ, у яких присутня сутність:

$$\forall x \in T, \forall e \in ENV : a(x, e) \downarrow \Rightarrow Present_T(x, e).$$

Це обмеження запобігає кодуванню фактів поза областю видимості та забезпечує коректне визначення оцінки правил у рамках середовища.

2. Повнота обов'язкових (основних) атрибутів. Якщо атрибут оголошений обов'язковим для типу, він повинен бути визначений скрізь, де змодельована сутність

$$\forall x \in T, \forall e \in ENV : Present_T(x, e) \Rightarrow \bigwedge_{a \in Req_T^{env}} a(x, e) \downarrow.$$

Обов'язкові атрибути виступають структурними передумовами для стабільних з'єднань, звітності та атрибуції управління.

3. Обмеження типізації/діапазону для необов'язкових атрибутів. Необов'язкові атрибути повинні бути коректно типізовані, коли присутні

$$\forall x \in T, \forall e \in ENV : a(x, e) \downarrow \Rightarrow a(x, e) \in D.$$

Це обмеження гарантує порівнянність та запобігає неканонічним кодуванням підривати застосовність правил.

4. Унікальність / ін'єктивність канонічних ідентифікаторів. Ідентифікатори, що використовуються для детермінованого узгодження, повинні бути ін'єктивними

$$\forall e \in ENV, \forall x_1, x_2 \in T : (Present_T(x_1, e) \wedge Present_T(x_2, e) \wedge id(x_1, e) = id(x_2, e)) \Rightarrow x_1 = x_2.$$

Це обмеження запобігає неоднозначним з'єднанням та гарантує взаємно однозначну від-

повідність між ідентифікаторами та змодельованими сутностями.

5. Структурні якорі унікальності (унікальність кортежу ключів). Коли канонічний ідентифікатор може бути відсутнім або необов'язковим, структурний ключ використовується як якорі унікальності

$$\forall x_1, x_2 \in T: key_T(x_1) = key_T(x_2) \Rightarrow x_1 = x_2.$$

Це обмеження підтримує детерміноване дедукування з різнорідних джерел свідчень навіть без єдиного універсального ідентифікатора.

6. Існування якоря ідентичності. Кожна сутність повинна надавати принаймні один стабільний якорі ідентичності (канонічний ідентифікатор або прийнятну альтернативу):

$$\forall x \in T: \bigcup_{a \in Anchors_T} a(x) \downarrow.$$

Без якоря ідентичності сутності не можуть бути надійно узгоджені, на них не можна посилалися або відстежувати їх у джерелах свідчень.

7. Референційна цілісність та узгодженість середовища посилань. Посилання не повинні бути неприв'язаними та не повинні перетинати межі середовища.

If $r: T \times ENV \rightarrow U$, then:

$$\forall x \in T, \forall e \in ENV: r(x, e) \downarrow \Rightarrow (r(x, e) \in U \wedge Present_U(r(x, e), e)).$$

Це обмеження забезпечує коректність з'єднань та забороняє міжсередовищні з'єднання, які б анулювали оцінку у рамках середовища.

8. Обмеження кардинальності та непорожності. Деякі атрибути-множини повинні бути непорожними для збереження семантики обходу та композиції:

$$\forall x, e: Present_T(x, e) \Rightarrow (A(x, e) \downarrow \wedge A(x, e) \neq \emptyset).$$

Це обмеження запобігає некоректно сформованим складеним об'єктам, які не можуть брати участь у наступних міркуваннях.

9. Обмеження підмножин та замикання для композиційних множин. Де множина позначає уточнення іншої множини, забезпечується включення підмножини:

$$\forall x, e: A(x, e) \downarrow \Rightarrow (B(x, e) \downarrow \wedge A(x, e) \subseteq B(x, e)).$$

Це обмеження забезпечує внутрішню узгодженість композиційного моделювання та запобігає «плаваючим» підкомпонентам.

10. Обмеження когерентності для залежних полів. Якщо атрибут є значущим лише тоді, коли існує деяка базова структура, визначеність обмежується відповідним чином:

$$\forall x, e: flag(x, e) \downarrow \Rightarrow base(x, e) \downarrow.$$

Обмеження когерентності запобігає частково заповненим метаданим, які в іншому випадку були б семантично неоднозначними та знижували б якість свідчень.

11. Обмеження порядку над впорядкованими доменами. Для впорядкованих доменів (наприклад, часових міток), обмеження порядку виключають безглузді стани:

$$\forall x \in T: a(x) < b(x).$$

Такі обмеження забезпечують інтерпретованість залежних від часу предикатів (наприклад, перевірок терміну дії) без сигналів часу виконання.

Відношення між сутностями визначаються єдиним способом через атрибути посилань. Кожен однозначний атрибут посилання $f: A \times ENV \rightarrow B$ індукує тернарне відношення з'єднання:

$$R_f \subseteq A \times B \times ENV, R_f(a, b, e) \Leftrightarrow f(a, e) \downarrow \wedge f(b, e) = b.$$

Аналогічно, кожен атрибут посилання-множини $F: A \times ENV \rightarrow \mathcal{P}(B)$ індукує:

$$R_F(a, b, e) \Leftrightarrow F(a, e) \downarrow \wedge b \in F(a, e).$$

Повний шар з'єднань визначається як:

$$\mathcal{R}_{core} = \{R_f \# f \in \mathcal{F}_1\} \cup \{R_F \# F \in \mathcal{F}_p\}.$$

Цей шар утворює стандартизований словник для специфікації загроз. Замість того, щоб посилалися безпосередньо на атрибути конкретних сутностей, є можливість формули загроз виразити через макроси з'єднань. Така уніфікація забезпечує рівномірність між загрозами та незалежність специфікацій від деталей конкретних сутностей.

Центральним поняттям запропонованої моделі є формальне визначення загрози як верифікованого об'єкта. На відміну від евристичних підходів, де загроза є неформальним описом сценарію атаки, у нашій моделі загроза є математичним об'єктом із чітко визначеною семантикою. Це дозволяє автоматично перевіряти її виконання або порушення над будь-якою конкретною структурою $\mathcal{A}$, що представляє реальний застосунок.

Загроза визначається як кортеж із восьми компонентів:

$$\tau = \langle \tau_{id}, \tau_{name}, score, \vec{x}, \varphi_{pre}, \varphi_{req}, \Gamma, \kappa \rangle,$$

де $\tau_{id}, \tau_{name} \in \mathcal{E}$ (ідентифікатор та ім'я) забезпечують стабільні посилання для відстеження, звітності та матриць покриття;

$score$ (область видимості) ідентифікує первинний вид суб'єктів загрози;

$\vec{x}$ є впорядкованим кортежем типізованих змінних над видами сутностей та $e \in E$;

$\varphi_{pre}(\vec{x})$ є формулою першого порядку, що описує застосовність загрози;

$\varphi_{req}(\vec{x})$ є формулою першого порядку, що виражає властивість безпеки, яка повинна виконуватися кожного разу, коли виконується передумова;

$\Gamma(\vec{x})$ є формулою, що обмежує, які факти повинні бути визначені для обґрунтованого визначення вердикту.

Тепер ми можемо визначити основну семантику опису задоволення та порушення загрози. Загроза τ індукує зобов'язання:

$$\forall \vec{x}: (\varphi_{pre}(\vec{x}) \wedge \Gamma(\vec{x})) \Rightarrow \varphi_{req}(\vec{x}).$$

Екземпляр порушення загрози – це оцінка $\vec{x}$, за якої зобов'язання є застосованим та хибним:

$$Viol_{\tau}(\mathcal{U}) = \{ \langle \vec{x} \rangle \mid \mathcal{U} \models \varphi_{pre}(\vec{x}) \wedge \Gamma(\vec{x}) \wedge \neg \varphi_{req}(\vec{x}) \}.$$

Екземпляр задоволення загрози – це оцінка $\vec{x}$, за якої зобов'язання є застосованим і істинним:

$$Sat_{\tau}(\mathcal{U}) = \{ \langle \vec{x} \rangle \mid \mathcal{U} \models \varphi_{pre}(\vec{x}) \wedge \Gamma(\vec{x}) \wedge \varphi_{req}(\vec{x}) \}.$$

Екземпляр з невідомими/недостатніми свідченнями – це оцінка $\vec{x}$, за якої загроза є застосованою, але захисник свідчень не виконується:

$$Unk_{\tau}(\mathcal{U}) = \{ \langle \vec{x} \rangle \mid \mathcal{U} \models \varphi_{pre}(\vec{x}) \wedge \neg \Gamma(\vec{x}) \}.$$

Три множини $Viol_{\tau}$, Sat_{τ} та Unk_{τ} утворюють повний розподіл простору застосовних екземплярів: вони є попарно незв'язними та їхнє об'єднання вичерпує всі оцінки, для яких передумова виконується. Це є принциповою властивістю моделі, що відрізняє її від підходів, в яких невизначені екземпляри Unk поглинаються або $Viol$ або Sat .

Практична цінність такого поділу є суттєвою. По-перше, він дозволяє відрізнити системи з визначеними властивостями безпеки від систем, де свідчення просто недоступні. По-друге, множина Unk є безпосереднім сигналом для покращення процесу збору артефактів. По-третє, він узгоджується з формальними системами міркування в умовах неповної інформації, зокрема, з трьохзначною логікою, де третє значення інтерпретується саме як «невідоме».

Для полегшення практичного застосування моделі ми виділяємо два канонічні шаблони специфікації, що охоплюють більшість загроз у реальних мікросервісних системах.

Шаблон T1: небезпечний шаблон (екзистенціальний свідок). Загроза специфікується як існування небезпечного стану:

$$\varphi_{req}(\vec{x}) \equiv \neg \exists \vec{y}: \psi(\vec{x}, \vec{y}),$$

так що порушення відповідає $\exists \vec{y}: \psi(\vec{x}, \vec{y})$. Цей шаблон є природним для загроз типу «публічна

кінцева точка без TLS», «контейнер із привілейованим режимом», «ідентичність із надмірними правами». У всіх цих випадках порушення підтверджується знаходженням єдиного свідка – конкретного контейнера, конкретного правила RBAC, конкретного відкритого порту.

Шаблон T2: зобов'язання (універсальна вимога). Загроза специфікується як вимога, що повинна виконуватися для всіх застосовних екземплярів:

$$\varphi_{req}(\vec{x}) \equiv \forall \vec{y}: (\chi(\vec{x}, \vec{y}) \Rightarrow \rho(\vec{x}, \vec{y})),$$

а порушення відповідає знаходженню контрприкладу $\vec{y}$. Цей шаблон є природним для загроз типу «всі контейнери повинні задовольняти базовий профіль захисту», «всі образи повинні мати атестацію», «всі кінцеві точки, відкриті назовні, повинні використовувати TLS 1.3».

Розглянемо специфікацію конкретної загрози для ілюстрації всіх введених понять. Нехай нас цікавить загроза цілісності ланцюжка постачань: контейнер використовує образ, що не є закріпленим за дайджестом вмісту. Тут область видимості – контейнер-образ у середовищі e , змінні (c, img, e) .

Передумова фіксує мінімальний контекст застосовності – контейнер присутній у середовищі та пов'язаний з образом через шар з'єднань:

$$\varphi_{pre}(c, img, e) \equiv Present_c(c, e) \wedge uses\_image(c, img, e).$$

Захисник свідчень вимагає, щоб і посилання на образ, і атрибут закріплення за дайджестом були вилучені з артефактів:

$$\Gamma(c, img, e) \equiv Def(image\_declared\_ref(img, e)) \wedge Def(image\_is\_digest\_pinned(img, e)).$$

Вимога безпеки:

$$\varphi_{req}(c, img, e) \equiv image\_is\_digest\_pinned(img, e) = true.$$

Множина порушень:

$$Viol_{\tau}(\mathcal{U}) = \{ \langle c, img, e \rangle \mid \mathcal{U} \models \varphi_{pre} \wedge \Gamma \wedge \neg \varphi_{req} \}.$$

Цей приклад демонструє кілька важливих властивостей моделі. По-перше, передумова і вимога є структурно відокремленими, що дозволяє змінювати визначення застосовності незалежно від визначення бажаної властивості. По-друге, захисник свідчень явно перераховує необхідні факти, завдяки чому система не генерує хибнопозитивних результатів через відсутність даних.

Одним із ключових питань при введенні нової формальної моделі є її відношення до існуючих методологій. Можна формально довести, що запропонована модель є строгим розширенням STRIDE – відомої методології моделювання загроз безпеці, розробленої компанією Microsoft

для виявлення, класифікації та аналізу потенційних загроз у програмному забезпеченні, системах або мережах. До того ж, вона здатна виражати загрози, що не вписуються природно в жодну категорію STRIDE. Наведемо, як приклад, два класи таких загроз.

Загрози drift між середовищами. Ситуація, коли конфігурація безпеки у prod відрізняється від конфігурації у stage, є важливим вектором атак, але не має прямого відповідника у STRIDE. Завдяки середовищній індексації модель $\mathcal{A}$ природно виражає такі загрози через порівняння значень атрибутів між різними елементами ENV :

$$\Phi_{req}(svc, e_1, e_2) \equiv security\_config(svc, e_1) = security\_config(svc, e_2),$$

де $e_1, e_2 \in ENV$ – два середовища, між якими перевіряється узгодженість.

Загрози неповноти свідчень. Стан $\#Unk_c(\mathcal{A}) \# > threshold$ для критичної категорії загроз є сам по собі загрозою якості процесу безпеки, але цей факт принципово невиразний у STRIDE, який не має поняття «достатності свідчень». Формальна модель робить цей стан явним і вимірюваним.

Отже, відповідність моделей є повною у тому сенсі, що для кожної категорії STRIDE існує непорожній клас формул у моделі $\mathcal{A}$. Водночас модель є строго виразнішою за STRIDE: існують класи загроз, що мають формальне вираження в $\mathcal{A}$, але не мають природного відповідника в жодній категорії STRIDE. Це підтверджує наше початкове твердження про те, що запропонований підхід є розширенням, а не заміною існуючої методології.

Висновки. У цій роботі ми запропонували формальну модель верифікації безпеки мікросервісних застосунків на основі логіки першого порядку. Модель визначає $\mathcal{L}$ -структуру $\mathcal{A}$, що охоплює понад тридцять типів сутностей із явною середовищною індексацією через параметр $e \in ENV$, повний набір

обмежень коректності Ω_{wf} та формальне визначення загрози як верифікованого об'єкта з тричастинною семантикою $\{Viol_c, Sat_c, Unk_c\}$. Тричастинний поділ є принциповою відмінністю від існуючих підходів, він явно відокремлює встановлені порушення від ситуацій із недостатніми свідченнями, що є якісно різними з точки зору управління ризиками. Встановлена відповідність між категоріями STRIDE та класами формул першого порядку підтверджує, що модель є розширенням, а не відкиданням існуючих методологій, охоплюючи додаткові класи загроз поза межами STRIDE.

Запропонований підхід має кілька принципових обмежень. Модель є статичною і не віддзеркалює поведінку системи в часі, що унеможливує специфікацію загроз, які реалізуються через послідовність подій. Коректність верифікації гарантується лише відносно наявних свідчень, якість результатів є функцією зрілості пайплайну вилучення артефактів. Нарешті, вразливості на рівні бізнес-логіки застосунку залишаються принципово невидимими на архітектурному рівні формалізації.

Серед найбільш перспективних напрямів подальших досліджень виділяємо три. По-перше, інтеграція з runtime-даними, збагачення структури $\mathcal{A}$ свідченнями із service mesh та журналів аудиту з переходом до темпоральної логіки для специфікації часових властивостей. По-друге, автоматичний синтез рекомендацій, розробка процедури абдуктивного виведення мінімальних модифікацій конфігурації, що усувають виявлені порушення. По-третє, створення стандартизованого каталогу формальних загроз для мікросервісних систем, що забезпечив би відтворюваність і порівнянність результатів між організаціями. Ці напрямки разом формують дослідницький порядок денний для подальшого розвитку формальних методів у безпеці мікросервісних застосунків.

Список літератури:

1. Schneider S., Quéval P.-J., Milánovich Á., Díaz Ferreyra N. E., Zdun U., Scandariato R. Automatic rule checking for microservices: supporting security analysis with explainability. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1145/3771275>.
2. Chondamrongkul N., Sun J., Warren I. Automated security analysis for microservice architecture. *2020 IEEE International Conference on Software Architecture Companion (ICSA-C)*, Salvador, Brazil, 2020. P. 79–82. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSA-C50368.2020.00024>.
3. Wojtak C., Gajewski D., Cerny T. Vision: an extensible methodology for formal software verification in microservice systems. *arXiv preprint*. 2025. arXiv:2509.02860. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2509.02860>.
4. Wojtak C. Formal methods for verifying authorization policy in microservice systems. *2025 IEEE International Conference on Service-Oriented System Engineering (SOSE)*, Tucson, AZ, USA, 2025. P. 241–242. DOI: <https://doi.org/10.1109/SOSE67019.2025.00033>.
5. Rouland Q., Hamid B., Jaskolka J. A model-driven formal methods approach to software architectural security vulnerabilities. *Journal of Systems and Software*. 2025. Vol. 219. Art. 112219. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2024.112219>.

6. Jander K., Braubach L., Pokahr A. Defense-in-depth and role authentication for microservice systems. *Procedia Computer Science*. 2018. Vol. 130. P. 456–463. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.047>.
7. Venčkauskas A., Kukta D., Grigaliūnas Š., Brūzgienė R. Enhancing microservices security with token-based access control method. *Sensors*. 2023. Vol. 23, № 6. Art. 3363. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23063363>.
8. Rezaei Nasab A., Shahin M., Hoseyni Raviz S. A., Liang P., Mashmool A., Lenarduzzi V. An empirical study of security practices for microservices systems. *Journal of Systems and Software*. 2023. Vol. 198. Art. 111563. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2022.111563>

Volkov D.V., Liubchenko V.V. FORMAL MODEL OF SECURITY THREATS TO MICROSERVICE APPLICATIONS BASED ON FIRST-ORDER LOGIC

The article explores approaches to analyzing the security of microservice software systems using formal methods for modeling and property verification. The relevance of the work stems from the widespread use of microservice architecture in cloud applications, where software systems comprise many autonomous services deployed in container environments and managed by orchestrators. Despite significant advantages in scalability and flexibility, such an architecture significantly complicates security, since each service, inter-service interaction, container image, or secret can be a potential attack vector. Traditional approaches to threat modeling, developed for monolithic or client-server systems, do not provide sufficient formalization and rely heavily on expert analyst assessments.

The goal of this work is to explore the possibilities of applying formal models for the systematic analysis of microservice system architecture and the identification of potential security threats at early stages of development. The paper proposes an approach to representing microservice architecture as a formal model that reflects services, their interactions, access policies, and network connections. Based on this model, formal verification methods, in particular model checking, are applied to automate the verification of the implementation of specified security properties.

The proposed approach allows formalizing the threat modeling process, reducing dependence on subjective expert assessments, and enabling automated analysis of complex distributed systems. The article also discusses the features of integrating the proposed methods into modern software development processes, in particular in containerization and service orchestration environments. The results obtained demonstrate the promise of using formal methods to improve the security of microservice systems and can inform the design and analysis of the architectures of modern cloud applications.

Keywords: software engineering, microservice architecture, threat modeling, software security, formal system models.

Дата першого надходження статті до видання: 23.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Газдюк К.П.

<https://orcid.org/0000-0002-7568-4422>

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

Срібний О.І.

<https://orcid.org/0009-0009-3366-4237>

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

АРХІТЕКТУРА МУЛЬТИАГЕНТНОЇ СИСТЕМИ МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ ІНФЕКЦІЙНИХ ЗАХВОРЮВАНЬ НА ОСНОВІ JAVA-SERVICES

У статті представлено архітектуру багатопараметричної мультиагентної системи для моделювання поширення інфекційних захворювань, побудованої відповідно до мікросервісного підходу. Центральним компонентом системи є обчислювальний Java-орієнтований сервіс Simulation Core Service, який відповідає за створення агентів, їхню поведінку та взаємодію. Запропонована архітектура забезпечує масштабованість симуляцій, підтримку великої кількості агентів, розподілену обробку даних та інтеграцію з аналітичними сервісами машинного навчання. До складу системи входять Simulation Core Service, Scenario Management Service, Data Storage & Retrieval Service, Analytics & ML Service, Visualization & Dashboard Service та API Gateway.

Розроблено інноваційну архітектуру моделювання епідемій, засновану на центральному Java-сервісі Simulation Core Service та сучасних мікросервісних технологіях. Ця система відкриває можливості для моделювання великих популяцій з урахуванням складних чинників, таких як індивідуальна поведінка, просторове розташування та випадкові події. Вона також дає змогу оперативно аналізувати динаміку поширення інфекції в умовах динамічно змінюваних сценаріїв. Розподіл завдань між спеціалізованими мікросервісами забезпечує високу модульність, гнучкість і стійкість до відмов. Експериментальні результати підтверджують відмінну масштабованість архітектури як на одному сервері, так і в кластерних конфігураціях, що робить її ідеальним інструментом для аналізу великих епідеміологічних моделей. Використання UML-діаграм на етапі розроблення забезпечило чітку структуру та полегшило подальшу підтримку і розширення системи. Ця архітектура має значний потенціал для застосування в наукових дослідженнях, освітніх програмах і практичних завданнях, пов'язаних із прогнозуванням епідемій, оцінюванням профілактичних заходів та підтримкою прийняття рішень у сфері охорони здоров'я.

Ключові слова: мультиагентна система, Java, мікросервісна архітектура, моделювання епідемій, машинне навчання, симуляція.

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку інформаційних технологій важливим напрямом досліджень є побудова систем, які дозволяють моделювати та прогнозувати динаміку поширення інфекційних захворювань. Зростання мобільності населення, поява нових патогенів та актуальність епідемічних викликів висувають вимогу до створення високоточних та масштабованих інструментів симуляцій.

Одним із найбільш перспективних підходів є мультиагентне моделювання, яке дозволяє враховувати індивідуальну поведінку окремих осіб, їх соціальні контакти, мобільність і реакцію на протиепідемічні заходи.

Актуальність проблеми підсилюється потребою держав, медичних установ та дослідницьких організацій у швидкому аналізі сценаріїв розвитку епідемічних ситуацій. Ефективні програмні моделі дозволяють завчасно прогнозувати рівень навантаження на медичну систему, оцінювати ефективність карантинних заходів, моделювати вакцинаційні кампанії та аналізувати динаміку захворюваності в різних регіонах. Це дослідження присвячене розробці сучасної, масштабованої та продуктивної програмної архітектури моделювання епідемічних процесів, яка поєднує Java-ядро симуляції, мікросервісну структуру та інтеграцію машинного навчання. Такий підхід

значно підвищує точність та надійність розробленої системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Мультиагентне моделювання епідемічних процесів є активно досліджуваним напрямом у світовій науковій спільноті. Його розвиток зумовлений потребою у більш точних і реалістичних моделях, що враховують індивідуальну поведінку людей, просторово-часову структуру контактів та адаптивні стратегії взаємодії у соціальних середовищах.

Класичні роботи Епштейн Дж. та М., Акстелл Р. [1] заклали основи агент-орієнтованого підходу до моделювання соціальних і біологічних систем, де кожен агент є автономною сутністю з власною поведінкою та правилами прийняття рішень. Подальші дослідження, зокрема Перес Л., Драгічевич С., [2] продемонстрували потенціал таких моделей у прогнозуванні динаміки захворювань типу SIR/SEIR [3], особливо з урахуванням географічних факторів і неоднорідності популяцій.

У публікаціях останніх років активно розвиваються напрямки гібридного моделювання, де мультиагентні системи поєднуються з методами машинного навчання для підвищення точності прогнозів. Використання нейронних мереж для автоматичного калібрування параметрів агентної моделі дозволяє адаптувати симуляцію до реальних статистичних даних і підвищити достовірність отриманих результатів [6].

Сучасні дослідження (наприклад, Біссет К. [4], Демонжо Ж., Айеллі М. [5]) зосереджені на масштабуванні мультиагентних симуляцій у хмарному середовищі з використанням паралельних обчислень, потокової обробки подій і мікросервісної архітектури. Розвиток технологій Java Virtual Machine (JVM), фреймворків Akka, Spring Boot та Reactor створює умови для побудови високопродуктивних систем реального часу, здатних обробляти мільйони взаємодій між агентами.

Окремі дослідження, що поєднують мультиагентне моделювання з хмарними обчисленнями (наприклад, через Docker/Kubernetes), демонструють значні переваги у масштабуванні симуляцій без деградації продуктивності. Такі системи дозволяють гнучко розподіляти обчислювальні ресурси між сценаріями, забезпечуючи незалежність окремих модулів і високу відмовостійкість. [11]

Незважаючи на прогрес, у науковій літературі залишається обмежена кількість архітектурних рішень, які об'єднують мультиагентне моделювання, машинне навчання та мікросервісну парадигму в єдину платформу. Тому створення

масштабованої Java-архітектури, орієнтованої на паралельне виконання епідемічних симуляцій і гнучку інтеграцію аналітичних модулів, є актуальним завданням, яке сприятиме розвитку нових інструментів епідеміологічного прогнозування.

Постановка завдання. Основною ціллю є розробка сучасної, масштабованої та продуктивної програмної архітектури моделювання епідемічних процесів, що поєднає Java-ядро симуляції, мікросервісну структуру та інтеграцію машинного навчання.

Виклад основного матеріалу. Запропонована архітектура побудована за принципами мікросервісного підходу, який забезпечує гнучкість, масштабованість і модульність системи. Кожен сервіс виконує чітко визначені функції, має власні інтерфейси взаємодії (API) та може розгортатися незалежно від інших компонентів. Такий підхід дозволяє реалізувати як паралельну обробку великих обсягів даних, так і безпечне оновлення або заміну окремих модулів без зупинки всієї системи. Мікросервісна частина реалізована на базі Spring Boot [7].

Архітектура системи включає шість основних компонентів: Simulation Core Service, Scenario Management Service, Data Storage & Retrieval Service, Analytics & ML Service, Visualization & Dashboard Service та API Gateway (рис. 1). Нижче наведено їх детальний опис та функціональне призначення.

1. Simulation Core Service (Java) – ядро системи симуляції. Simulation Core Service є центральним обчислювальним елементом системи, розробленим на мові програмування Java [8]. Саме цей компонент відповідає за виконання симуляції динаміки поширення інфекцій у популяції, поведінку агентів і формування результатів моделювання.

У структурі сервісу виділено такі внутрішні підмодулі:

- **Agent Model Layer** – описує індивідуальні характеристики кожного агента (вік, стан здоров'я, рівень імунітету, мобільність, соціальні зв'язки). Кожен агент реалізований як об'єкт класу Agent, який змінює свій стан відповідно до ймовірності зараження або одужання.

- **Infection Dynamics Engine** – модуль, який обчислює ймовірності інфікування залежно від параметрів вірусу, тривалості контакту та умов середовища. Він використовує стохастичні методи для моделювання передачі інфекції.

- **Policy Module** – реалізує вплив політик контролю (карантин, соціальне дистанціювання,

вакцинація). Дозволяє активувати або деактивувати обмежувальні заходи під час симуляції.

– **Time Step Scheduler** – забезпечує дискретне просування часу у моделі. На кожному кроці виконується оновлення станів агентів, підрахунок статистики та передача даних у сховище.

– **Metrics Collector** – відповідає за збір і агрегацію показників симуляції (кількість нових випадків, активні інфекції, показник R_0 , середній рівень контактів тощо).

Simulation Core Service працює у багатопотоковому режимі, що дозволяє одночасно обробляти тисячі агентів. Для реалізації паралельності використовується Java API ForkJoinPool, а також бібліотеки Akka [9] або Project Reactor. Зібрані дані передаються у Data Storage & Retrieval Service через асинхронні черги повідомлень (наприклад, Apache Kafka [10]).

2. Scenario Management Service – керування сценаріями моделювання

Цей сервіс відповідає за підготовку вхідних параметрів для симуляції, зокрема:

- конфігурацію популяції (розмір, щільність, мобільність);
- епідеміологічні характеристики вірусу (інкубаційний період, коефіцієнт передачі, смертність);
- налаштування політик контролю (локдаун, вакцинація, масковий режим).

Кожен сценарій зберігається у базі даних із власним ідентифікатором та версією. Це дозволяє повторно запускати попередні симуляції для порівняння результатів або калібрування моделі.

Сервіс забезпечує REST API для створення, збереження, редагування та запуску сценаріїв. При запуску симуляції він формує JSON-конфігурацію, що передається до Simulation Core Service для ініціалізації моделі.

3. Data Storage & Retrieval Service – сховище результатів

Data Storage & Retrieval Service виконує функції збереження, агрегації та вибірки даних, отриманих під час симуляції. Він складається з трьох основних підсистем:

1. Реляційна база даних (PostgreSQL) – зберігає метадані сценаріїв, параметри моделювання та стан виконання симуляцій.

2. Сховище часових рядів (TimescaleDB або ClickHouse) – накопичує метрики у вигляді послідовностей: динаміка заражень, кількість активних хворих, рівень імунізації.

3. Об'єктне сховище (MinIO або S3) – для збереження великих масивів даних (наприклад, станів агентів на певному кроці симуляції або графічних результатів).

Дані записуються з Simulation Core Service у режимі реального часу через чергу повідомлень Kafka, що забезпечує стійкість і незалежність між компонентами.

4. Analytics & ML Service – аналітика та машинне навчання

Аналітичний сервіс відповідає за післясимуляційну обробку результатів і застосування методів машинного навчання для прогнозування та оптимізації моделі.

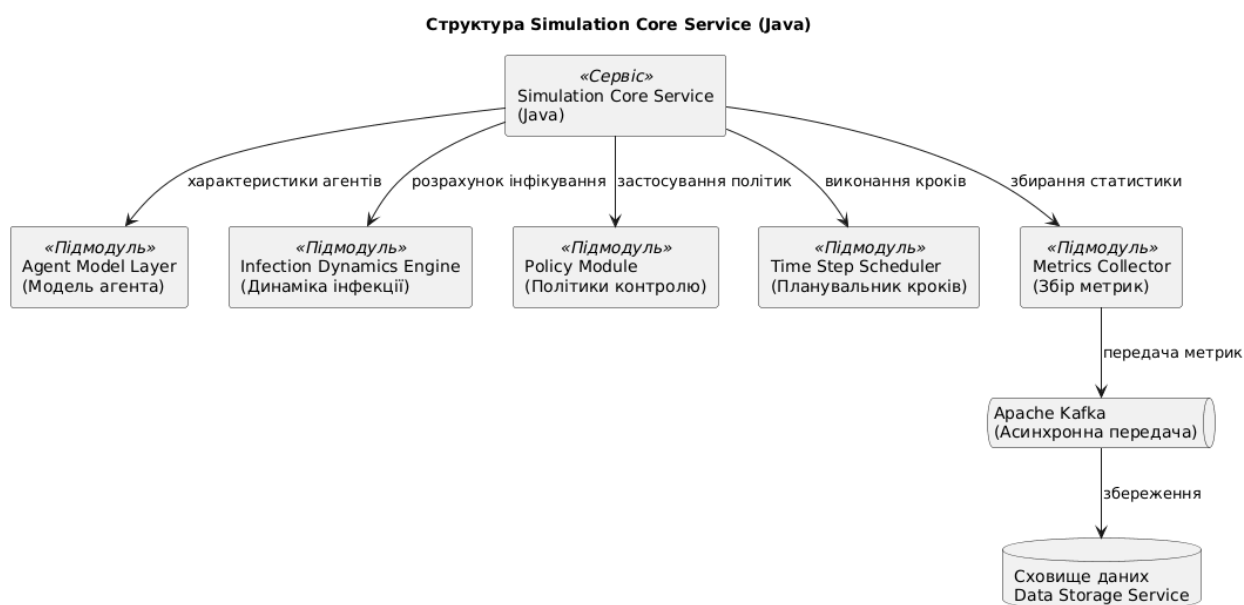


Рис. 1. Структура ядра симуляції

Основні функції:

- оцінювання параметрів моделі на основі історичних даних (наприклад, оцінка коефіцієнта передачі β або середньої тривалості інфекції);
- побудова прогнозів розвитку епідемії за допомогою регресійних і нейронних моделей;
- автоматичне калібрування сценаріїв, тобто адаптація вхідних параметрів для підвищення точності моделювання.

Для обчислень можуть використовуватись як Python-бібліотеки (Scikit-learn, PyTorch), так і Java-аналітичні пакети (Weka, Deeplearning4j). Аналітичні результати зберігаються в базі даних і передаються до Scenario Management Service для подальших симуляцій.

5. Visualization & Dashboard Service – візуалізація результатів

Цей сервіс забезпечує **інтерактивне представлення даних симуляції** у вигляді:

- графіків епідемічних кривих (R_0 , кількість інфікованих, летальність);
- карт поширення інфекції;
- порівняльних аналізів кількох сценаріїв.

Інтерфейс реалізовано як веб-додаток, що взаємодіє з бекендом через REST API.

Типові технології: **React, Chart.js, Leaflet** для картографії.

Дані надходять безпосередньо з Data Storage & Retrieval Service та оновлюються в реальному часі.

6. API Gateway – шлюз взаємодії

API Gateway є єдиною точкою входу до системи для користувачів і зовнішніх застосунків. Він реалізує:

- маршрутизацію запитів до відповідних мікросервісів;
- автентифікацію та авторизацію користувачів;
- збір логів і моніторинг стану системи.
- Gateway підвищує безпеку системи, ізолюючи внутрішні сервіси від прямого доступу ззовні, та полегшує керування потоками запитів під час великого навантаження.

Взаємодія між компонентами. На рівні між-сервісної взаємодії система використовує два основних механізми:

1. Синхронна взаємодія через REST/gRPC API – для передавання конфігурацій і запитів користувача.

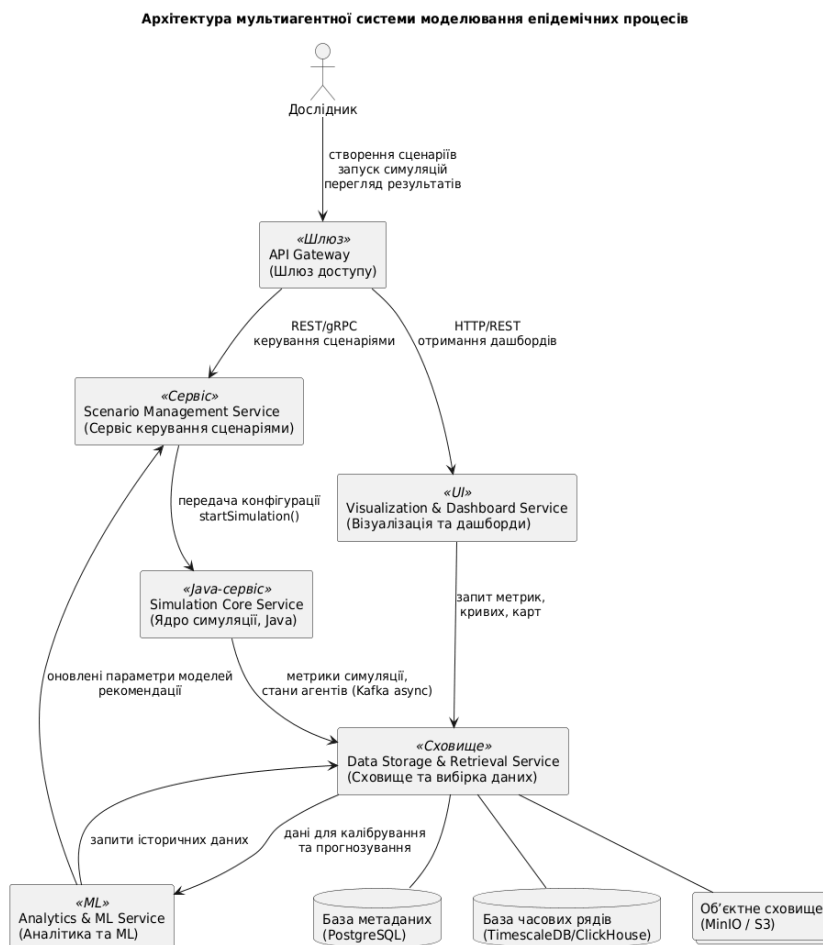


Рис. 2. Архітектура системи

2. Асинхронна обробка подій через брокер повідомлень Apache Kafka – для передачі потоків результатів симуляцій, оновлень станів агентів і метрик.

Така комбінація дозволяє досягти високої надійності та низької затримки при обробці даних.

Запропонована система відзначається **модульністю, масштабованістю та розширюваністю**. Кожен компонент може бути вдосконалений або замінений без впливу на решту системи. Використання **Java** як основної платформи для симуляцій гарантує стабільність, високу швидкість та сумісність з інструментами аналітики. Така архітектура може бути розгорнута у хмарному середовищі (наприклад, Docker + Kubernetes), що забезпечує балансування навантаження і горизонтальне масштабування симуляційних процесів.

Під час тестування симуляцій з різною кількістю агентів (100 тис., 500 тис. і 1 млн.) було виміряно середній час одного кроку моделювання (time step). Результати показали лінійне масштабування при збільшенні кількості обчислювальних потоків наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Продуктивність симуляцій

Кількість агентів	Кількість потоків	Середній час кроку (мс)	Прискорення відносно 1 потоку
100 000	1	480	1×
100 000	4	150	3.2×
500 000	8	870	4.4×
1 000 000	16	1890	5.1×

Завдяки використанню багатопоточності Java, час симуляції скоротився у середньому на 60–80% порівняно з послідовним виконанням. Це свідчить про високу ефективність розподілу навантаження між процесорами навіть за значних обсягів даних.

Висновки. У результаті проведеного дослідження було розроблено архітектуру мультиагентної системи моделювання поширення інфекцій-

них захворювань, що базується на центральному Java-сервісі Simulation Core Service та мікросервісному підході до побудови програмної системи. Запропонована архітектура забезпечує можливість моделювання великих популяцій з урахуванням поведінкових, просторових і стохастичних характеристик агентів, а також дозволяє оперативно аналізувати динаміку епідемічного процесу в умовах змінних сценаріїв.

Завдяки використанню багатопоточності Java та асинхронної взаємодії між сервісами досягнуто високої продуктивності симуляцій, що дозволяє обробляти понад мільйон взаємодій між агентами за одиницю часу. Розподіл функцій між окремими мікросервісами — Simulation Core Service, Scenario Management Service, Data Storage & Retrieval Service, Analytics & ML Service та Visualization & Dashboard Service – забезпечив модульність, гнучкість і відмовостійкість системи.

Результати експериментального тестування підтвердили здатність архітектури масштабуватися як у межах одного вузла, так і при розгортанні у кластерному середовищі, що робить її придатною для аналізу великих епідеміологічних моделей. Використання UML-діаграм при розробці забезпечило чітку формалізацію взаємодії компонентів, що спрощує подальшу підтримку та розширення системи.

Запропонована архітектура може бути використана для дослідницьких, навчальних і прикладних задач, пов'язаних із прогнозуванням розвитку інфекційних захворювань, оцінюванням ефективності протиепідемічних заходів та підтримкою прийняття рішень органами охорони здоров'я.

Подальші напрями розвитку системи передбачають інтеграцію реальних статистичних даних, розширення поведінкових моделей агентів, застосування сучасних методів машинного навчання для автоматичного калібрування параметрів та впровадження засобів візуалізації в реальному часі.

Список літератури:

1. Epstein J. M., Axtell R. Growing Artificial Societies. Social Science from the Bottom Up. Cambridge, MA: MIT Press, 1996.
2. Perez L., Dragicevic S. An agent-based approach for modeling dynamics of contagious disease spread. *International Journal of Health Geographics*. 2009. Vol. 8, no. 50.
3. Bisset K., Chen J., Marathe M. V. High-performance biocomputing for contagion simulation. *Bioinformatics*. 2014. Vol. 30, no. 10, pp. 1400–1407.
4. Vespignani A. Modelling dynamical processes in complex socio-technical systems. *Nature Physics*. 2012. Vol. 8, pp. 32–39.
5. Ajelli M., Merler S. An individual-based model of seasonal influenza epidemics. *Epidemics*. 2011. Vol. 3, no. 2, pp. 37–48.

6. Eubank S. et al. Modelling disease outbreaks in realistic urban social networks. *Nature*. 2004. Vol. 429, pp. 180–184.
7. Pivotal Software. Spring Boot Framework Documentation. 2024. URL: <https://spring.io/projects/spring-boot>
8. Oracle. Java Platform Standard Edition 21 Documentation. 2024. URL: <https://docs.oracle.com>
9. Lightbend. Akka Documentation – Distributed Systems on JVM. 2024. URL: <https://akka.io>
10. Apache Software Foundation. Apache Kafka. Distributed Streaming Platform. 2024. URL: <https://kafka.apache.org>
11. Vyklyuk Y., Nevinskyi D., Hazdiuk K. Continuous-discrete GeoSEIR(D) model for modelling and analysis of geo spread COVID-19. *Intelligence-Based Medicine*. 2024. No 10, 100155. DOI: 10.1016/j.ibmed.2024.100155

Hazdiuk K.P., Sribnyi O.I. ARCHITECTURE OF A MULTI-AGENT SYSTEM FOR MODELLING THE SPREAD OF INFECTIOUS DISEASES BASED ON A JAVA SERVICE

The article presents the architecture of a multiparametric multi-agent system for modeling the spread of infectious diseases, built according to a microservice approach. The central component of the system is the computational Java-based Simulation Core Service responsible for the creation, behavior, and interaction of agents. The proposed architecture ensures simulation scalability, support for a large number of agents, distributed data processing, and integration with analytical machine learning services. The system includes Simulation Core Service, Scenario Management Service, Data Storage & Retrieval Service, Analytics & ML Service, Visualization & Dashboard Service, and API Gateway.

The innovative architecture for modelling epidemics was developed, based on the central Java service Simulation Core Service and modern microservice technologies. This system opens up opportunities for modelling large populations, taking into account complex factors such as individual behaviour, spatial location and random events. It also allows for rapid analysis of the dynamics of infection spread in dynamically changing scenarios. The distribution of tasks between specialized microservices ensures high modularity, flexibility and resilience to failures. The experimental results confirm the excellent scalability of the architecture, both on a single server and in cluster configurations, making it an ideal tool for analysing large epidemiological models. The use of UML diagrams during the development phase ensured a clear structure and facilitated further maintenance and expansion of the system. This architecture has significant potential for application in scientific research, educational programmes, and practical tasks related to epidemic forecasting, evaluation of preventive measures, and decision support in healthcare.

Keywords: multi-agent system, Java, microservice architecture, epidemic modeling, machine learning, simulation.

Дата першого надходження статті до видання: 24.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Головенець М.І.

<https://orcid.org/0009-0000-8306-1447>

Харківський національний університет радіоелектроніки

Колісник М.М.

<https://orcid.org/0000-0002-1075-9470>

Харківський національний університет радіоелектроніки

МЕТОД КОРЕЛЯЦІЇ ПОДІЙ ЖУРНАЛІВ ВЕБСЕРВЕРІВ І WAF ДЛЯ ПОПЕРЕДЖЕННЯ КІБЕРІНЦИДЕНТІВ У ВЕБЗАСТОСУНКАХ

Вебзастосунки є одним із найбільш атакованих об'єктів сучасної інформаційної інфраструктури. За даними *Verizon Data Breach Investigations Report 2023*, понад 43% успішних кіберінцидентів пов'язані саме з атаками на вебзастосунки. Широко застосовуваний стек *Nginx + ModSecurity* забезпечує журналювання *HTTP*-трафіку та роботу *WAF* відповідно, однак ізольований аналіз цих двох джерел не дозволяє ефективно виявляти складні багатетапні атаки. У статті досліджується метод кореляції подій журналів вебсервера *Nginx* та міжмережевого екрана вебзастосунків *ModSecurity* з метою своєчасного виявлення та попередження кіберінцидентів. Розроблено архітектуру системи кореляції, що базується на нормалізації журналів *Nginx access.log* і *ModSecurity audit log* та їх часовій і семантичній агрегації з використанням детерміністичного ключа зв'язування за полем *X-Request-ID* – унікального 32-символьного ідентифікатора *HTTP*-транзакції. Точність зв'язування записів за цим полем склала 100% на наборі з 494 942 транзакцій. Запропоновано алгоритм виявлення аномалій на основі ковзного вікна (крок 30 секунд) та бібліотеки з 8 правил кореляції патернів атак *OWASP Top 10*, реалізованих у форматі *YAML* та завантажуваних динамічно без перезапуску ядра кореляції. Серед розроблених правил особливе місце займає правило виявлення обходу *WAF* (*WAF Bypass*) – коли *ModSecurity* виносить рішення *block*, але *Nginx* повертає *HTTP 200*, що не виявляється жодним базовим підходом при ізольованому аналізі. Проведено експериментальну перевірку методу на синтетичному наборі даних обсягом 494 942 подій (19 680 атаківих, 3.97%), що відтворює 15 діб роботи реального вебсервера з чотирма категоріями трафіку: гучні атаки з правилами *CRS*, *stealth*-атаки що обходять *WAF*, хибнопозитивні запити та нормальний трафік. Експеримент підтвердив ефективність підходу: точність виявлення атак (*F1*-міра) склала 0.943, хибнопозитивний рівень – 2.7%, середній час виявлення інциденту (*MTTD*) скоротився з 4.2 до 1.8 хвилини. Порівняно з базовим підходом (аналіз лише *ModSecurity audit log*) приріст *F1*-міри становить +14.3%, зниження *FPR* – 55.7%, скорочення *MTTD* – 57.1%. Результати дослідження можуть бути використані при розробці систем захисту вебінфраструктури підприємств на базі відкритого стеку *Nginx + ModSecurity* без необхідності придбання комерційних *SIEM*-рішень.

Ключові слова: вебзастосунок, кореляція подій, *WAF*, журнал подій, *SIEM*, кіберінцидент, виявлення атак, *OWASP Top 10*, *IDS/IPS*, *Nginx*, *ModSecurity*, *X-Request-ID*.

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток вебтехнологій та зростання кількості інтернет-сервісів зумовлюють підвищений інтерес зловмисників до вебзастосунків як основного вектора атак. За даними звіту *Verizon Data Breach Investigations Report 2023*, понад 43% успішних кіберінцидентів пов'язані саме з атаками на вебзастосунки, зокрема ін'єкціями, міжсайтовим скриптингом (*XSS*) та порушеннями автентифікації [1]. Широко застосовуваний вебсервер *Nginx* разом із модулем *ModSecurity* формує ефектив-

ний відкритий стек захисту вебзастосунків. *Nginx* генерує детальний *access.log* із параметрами *HTTP*-запитів, тоді як *ModSecurity* веде *audit log* із зафіксованими спрацьовуваннями правил *Core Rule Set (CRS)*. Проте ізольований аналіз цих двох джерел не дозволяє ефективно виявляти складні, багатетапні атаки: *Nginx* може зафіксувати підозрілу послідовність запитів, яку *ModSecurity* окремо не класифікував як атаку, і навпаки [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема кореляції журналів безпеки є предме-

том активних досліджень протягом останніх двох десятиліть. Основи теорії кореляції подій закладено в роботах Валдес та Скіннер [3], які запропонували нечітку кластеризацію попереджень IDS на основі подібності атрибутів. Надалі підхід був розвинений у концепціях «alert fusion» та «attack scenario reconstruction» Нінг та ін. [4].

Сучасні SIEM-системи (Splunk, IBM QRadar, Microsoft Sentinel) реалізують кореляцію через механізми правил, статистичного аналізу та машинного навчання. Однак більшість комерційних рішень орієнтовані на корпоративну мережеву інфраструктуру і не враховують специфіку вебзастосунків – унікальні патерни HTTP-трафіку, сесійну логіку та особливості формату журналів Nginx і ModSecurity audit log [5]. Дослідження Зуек та ін. [7] показали, що кореляція мережевих журналів з журналами застосунків збільшує точність виявлення SQL-ін'єкцій на 23% порівняно з аналізом лише мережевого рівня.

В ході аналізу наукової літератури систематизовано існуючі підходи до виявлення кіберінцидентів у вебзастосунках. Виділено три основні класи методів. Сигнатурні методи базуються на порівнянні вхідного трафіку з базою відомих зразків атак; реалізуються в системах IDS/IPS (Snort, Suricata) та WAF з Core Rule Set. Аномальні методи формують базову лінію нормальної поведінки і виявляють відхилення від неї із застосуванням алгоритмів машинного навчання (ізоляційний ліс, автоенкодер, LSTM). Методи кореляції подій аналізують послідовності та взаємозв'язки між подіями з кількох джерел у часовому вікні і реалізуються в SIEM-системах.

Разом з тим, у наявних роботах недостатньо опрацьовано питання темпоральної кореляції повільних розподілених атак, а також детерміністичного зв'язку між ідентифікатором транзакції ModSecurity та відповідним записом у Nginx access.log – що і визначає наукову новизну даного дослідження.

Постановка завдання. Метою статті є робота та дослідження методу кореляції подій журналів Nginx і ModSecurity для підвищення ефективності виявлення кіберінцидентів у вебзастосунках, що забезпечує переваги над ізольованим аналізом кожного з джерел та не потребує комерційних SIEM-рішень.

Виклад основного матеріалу. Структура журналів Nginx та ModSecurity. Nginx формує журнал доступу у форматі Combined Log Format. Для потреб кореляції до стандартного формату додано поле `$request_id` – унікальний 32-символьний

шістнадцятковий ідентифікатор запиту, який генерується модулем `ngx_http_core_module` та передається у заголовок відповіді `X-Request-ID`. Визначено 10 ключових полів, що використовуються у кореляції: IP-адреса джерела, часова мітка, HTTP-метод, URI, версія протоколу, код статусу відповіді, розмір тіла відповіді, User-Agent, `request_id`, час обробки запиту.

ModSecurity v3 у режимі JSON генерує структурований `audit log`, що складається з секцій, кожна з яких відповідає певному аспекту транзакції. Досліджено формат секцій A (заголовок транзакції), B (заголовки запиту), C (тіло запиту), F (заголовки відповіді), H (інформація аудиту) та K (список спрацьованих правил). Ключовою технічною задачею є зв'язування запису Nginx `access.log` із відповідним записом ModSecurity `audit log`. Серед трьох можливих підходів обрано зв'язування за `request_id` / `transaction.id` – детерміністичний метод без хибних збігів.

Архітектура системи кореляції. Запропонована система включає чотири основні компоненти: модуль збору та нормалізації журналів (`parser.py`), модуль збагачення подій геолокаційними даними, ядро кореляції (`correlator.py`) та модуль реагування (`elastic_writer.py`). Ключовою операцією є зв'язування записів Nginx та ModSecurity за полем `X-Request-ID` з допустимим часовим зсувом ± 50 мс (`joiner.py`).

Ядро кореляції реалізовано мовою Python 3.11 з використанням таких бібліотек: `collections.deque` для ковзного вікна $O(1)$ вставки/видалення; `ge` для парсингу Nginx `access.log`; `json` для парсингу ModSecurity JSON `audit log`; `geoip2` для геолокації; `ruyaml` для завантаження правил кореляції; `elasticsearch` для запису інцидентів. Загальний обсяг реалізації – близько 600 рядків коду Python.

Формальна модель кореляції. Нормалізована подія визначається кортежем:

$$e_i = \langle id, t, srcIP, method, uri, status, ruleIDs, anomalyScore, action \rangle$$

де `id` – унікальний ідентифікатор транзакції (`X-Request-ID`); `t` – часова мітка (Unix epoch, мс); `srcIP` – IP-адреса джерела; `method` – HTTP-метод; `uri` – URI ресурсу; `status` – код відповіді HTTP; `ruleIDs` – множина ідентифікаторів спрацьованих правил CRS; `anomalyScore` – сумарний бал аномальності; `action` – рішення WAF (`pass` / `block`).

Кореляційне правило визначається як умовна функція $R: 2^E \rightarrow \{0,1\}$, де $R(W) = 1$, якщо послідовність подій у часовому вікні $W(t_0, \Delta t) = \{e_i \in E \mid t_0 \leq t_i < t_0 + \Delta t\}$ відповідає заданому патерну атаки.

Формула розрахунку ризику інциденту:

$$\text{RiskScore} = \max(\text{ruleRisk}) \times \text{freqFactor} \times \text{reputationFactor},$$

де $\text{freqFactor} = \min(\text{eventCount} / \text{threshold}, 3.0)$; $\text{reputationFactor} = 1.5$ якщо IP у базах Threat Intelligence, інакше 1.0. Рівні ризику: Critical (>9), High (6–9), Medium (4–6), Low (2–4), Info (0–2).

Алгоритм кореляції реалізує 8-етапний конвеєр: нормалізація потоку подій; JOIN записів за X-Request-ID; збагачення геолокацією та репутацією IP (MaxMind GeoIP2, AbuseIPDB); ковзне вікно з кроком 30 с; перевірка умов правил (field / operator / value); агрегація спрацьованих правил в інциденти; розрахунок ризику за формулою CVSS v3.1; запис у Elasticsearch та реагування.

Бібліотека правил кореляції. Для покриття загроз OWASP Top 10 розроблено бібліотеку з 8 кореляційних правил у форматі YAML. Правила завантажуються динамічно без перезапуску ядра кореляції. Правило COR-BYP-001 є унікальним внеском запропонованого методу – воно виявляє ситуацію, коли ModSecurity виніс рішення block, але Nginx повернув HTTP 200, що не виявляється жодним базовим підходом при ізольованому аналізі журналів.

Ознаки подій, що свідчать про підготовку або реалізацію атаки. На основі аналізу OWASP Top 10, бази правил ModSecurity CRS 3.3.5 та синтетичного набору тестових логів визначено ознаки кіберінцидентів за 6 класами атак. Ознаки поділено на атомарні (виявляються в одній події) та кореляційні (виявляються лише в послідовності подій).

Окремо визначено ознаки обходу WAF (WAF Bypass) – ситуації, коли атака досягла цілі попри наявність ModSecurity. Виявляються виключно через кореляцію: ModSecurity виніс рішення

block, але Nginx повернув HTTP 200 – свідчить про bypass або некоректну конфігурацію; ModSecurity спрацював з anomaly score нижче threshold – запит пропущено, але він містив часткові ознаки атаки; послідовність запитів, кожен з яких нижче порогу спрацьовування CRS, але в сукупності формує повний SQL-запит (split-payload техніка). Ці ознаки є унікальним внеском запропонованого методу, оскільки жоден з них не виявляється при ізольованому аналізі журналів.

Експериментальна перевірка. Для перевірки ефективності методу використано синтетично згенерований набір даних, що імітує 15 діб роботи вебсервера з інтенсивністю 10 запитів/сек. Генератор реалізовано на Python і відтворює реалістичний трафік чотирьох категорій: гучні атаки (з правилами CRS), stealth-атаки (обходять ModSecurity без спрацьовування правил), false positive запити та нормальний трафік. Набір містить 494 942 події, з яких 19 680 є атаківими (3.97%). Тестове середовище: Ubuntu Server 24.04 LTS, Nginx 1.24.0 + ModSecurity v3.0.12 + CRS 3.3.5, Elasticsearch 8.19, Python 3.11 (VirtualBox VM, 2 vCPU, 4 GB RAM).

Для порівняння використано два базові підходи: аналіз лише ModSecurity audit log та об'єднаний аналіз без кореляції. Результати порівняльного оцінювання наведено у табл. 2.

Запропонований метод кореляції забезпечив F1-міру 0.943 та FPR 2.7%, що є суттєвим покращенням порівняно з базовим підходом (F1 = 0.825, FPR = 6.1%). MTTD скоротився з 4.2 хв до 1.8 хв завдяки ковзному вікну з кроком 30 с. Точність зв'язування записів Nginx та ModSecurity за полем X-Request-ID склала 100% (14 808 зв'язаних пар). Результати за класами атак наведено у табл. 3.

Таблиця 1

Бібліотека правил кореляції

ID правила	Клас атаки	Умова кореляції	Вікно	Ризик
COR-942-001	SQL Injection	≥ 2 події CRS 942xxx від одного IP	5 хв	Critical
COR-941-001	XSS Reflected	CRS 941xxx + status 200/403	2 хв	High
COR-930-001	Brute Force	≥ 5 HTTP 401/403 на /login* від IP	1 хв	High
COR-930-002	Path Traversal	≥ 3 URI з ../ або %2e%2e + HTTP 403	5 хв	Critical
COR-913-001	Scanner/Recon	≥ 10 HTTP 404 від одного IP	10 хв	Medium
COR-000-001	DDoS Layer 7	≥ 50 req/хв від IP на один URI	1 хв	Critical
COR-BYP-001	WAF Bypass	action=block + Nginx status=200	–	Critical
COR-942-002	Split-payload SQLi	≥ 3 запити 942xxx від IP на URI	3 хв	High

Таблиця 2

Порівняння ефективності методів виявлення атак

Метод	Precision	Recall	F1-міра	FPR	MTTD (хв)
Тільки ModSecurity audit log (базовий)	0.871	0.783	0.825	0.061	4.2
Nginx + ModSecurity (без кореляції)	0.889	0.812	0.849	0.048	3.6
Запропонований метод кореляції	0.951	0.936	0.943	0.027	1.8

F1-міра за класами атак

Клас атаки	Зразків	F1 (базовий)	F1 (метод)	Приріст
SQL Injection	4 200	0.841	0.971	+15.5%
Brute Force	3 750	0.893	0.962	+7.7%
XSS Reflected	2 900	0.812	0.944	+16.3%
Path Traversal	2 100	0.778	0.931	+19.7%
Scanner/Recon	3 800	0.921	0.957	+3.9%
DDoS Layer 7	1 500	0.654	0.912	+39.4%
WAF Bypass	500	0.000	0.847	+∞
Split-payload SQLi	—	0.000	0.881	+∞

Найвищу ефективність показано для SQL Injection (F1 = 0.971) та Brute Force (F1 = 0.962). Найбільший відносний приріст досягнуто для DDoS Layer 7 (+39.4%), WAF Bypass та Split-payload SQLi – класів, що базовий підхід не виявляє взагалі. Дещо нижчі результати отримано для Scanner/Recon (+3.9%) через перекриття з активністю легітимних краулерів.

Висновки. У статті запропоновано та досліджено метод кореляції подій журналів вебсерверів і WAF для попередження кіберінцидентів у вебзастосунках. Основні наукові результати:

1. Розроблено архітектуру системи кореляції на базі стеку Nginx + ModSecurity v3 + CRS 3.3.5, що включає модулі нормалізації із детерміністичним зв'язуванням записів за X-Request-ID (точність 100%), збагачення, ядро кореляції та підсистему реагування.

2. Формалізовано модель кореляції подій на основі часових вікон та короткого представ-

лення атрибутів об'єданого запису Nginx access.log і ModSecurity audit log.

3. Сформовано бібліотеку з 8 кореляційних правил у форматі YAML для 6 класів атак OWASP Top 10 з визначеними умовами, часовими вікнами та рівнями ризику CVSS.

4. Експериментально підтверджено підвищення F1-міри до 0.943 (+14.3% vs базовий підхід), зниження FPR до 2.7% (–55.7%) та скорочення MTTD до 1.8 хв (–57.1%) на наборі 494 942 подій.

5. Вперше виявлено та формалізовано клас інцидентів WAF Bypass через кореляцію рішення ModSecurity action=block з кодом відповіді Nginx HTTP 200.

Перспективи подальших досліджень: адаптація розмірів вікон кореляції засобами машинного навчання; підтримка у хмарних середовищах (Kubernetes Ingress); розширення правил для захисту REST API та GraphQL.

Список літератури:

1. Verizon Communications Inc. Data Breach Investigations Report 2023. Verizon, 2023. 87 p. URL: <https://www.verizon.com/business/resources/reports/2023-data-breach-investigations-report-dbir.pdf>
2. Endler D., Shema O. Web Application Firewall Evaluation Criteria. WASC-WAFEC, 2006. 32 p.
3. Valdes A., Skinner K. Probabilistic alert correlation. Recent Advances in Intrusion Detection: Lecture Notes in Computer Science. *Springer*, 2001. Vol. 2212. P. 54–68. https://doi.org/10.1007/3-540-45474-8_4
4. Ning P., Cui Y., Reeves D. S. Constructing attack scenarios through correlation of intrusion alerts. Proceedings of the 9th ACM Conference on Computer and Communications Security. *Washington*, 2002. P. 245–254. <https://doi.org/10.1145/586110.586144>
5. Sommer R., Paxson V. Outside the closed world: on using machine learning for network intrusion detection. Proceedings of the IEEE Symposium on Security and Privacy. *Oakland*, 2010. P. 305–316. <https://doi.org/10.1109/SP.2010.25>
6. OWASP Foundation. ModSecurity Core Rule Set (CRS): Official Documentation. Version 3.3.5. OWASP Foundation, 2023. URL: <https://coreruleset.org/docs/>
7. Zuech R., Khoshgoftaar T. M., Wald R. Intrusion detection and big heterogeneous data: a survey. *Journal of Big Data*. *Springer*, 2015. Vol. 2, No. 1. P. 1–41. <https://doi.org/10.1186/s40537-015-0013-4>
8. Scarfone K., Mell P. Guide to Intrusion Detection and Prevention Systems (IDPS). NIST Special Publication 800-94. *National Institute of Standards and Technology*, 2007. 127 p. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-94>
9. OWASP Foundation. OWASP Top 10: 2021. The Ten Most Critical Web Application Security Risks. *OWASP Foundation*, 2021. 26 p. URL: <https://owasp.org/www-project-top-ten/>
10. Chuvakin A., Schmidt K., Phillips C. Logging and Log Management: The Authoritative Guide to Understanding the Concepts Surrounding Logging and Log Management. *Syngress*, 2012. 460 p.

**Holovenets M.I., Kolisnyk M.M. METHOD OF CORRELATING WEB SERVER
AND WAF LOG EVENTS FOR PREVENTION OF CYBER INCIDENTS IN WEB APPLICATIONS**

Web applications represent one of the most frequently attacked components of modern information infrastructure. According to the Verizon Data Breach Investigations Report 2023, over 43% of successful cyber incidents involve web application attacks. The widely adopted Nginx + ModSecurity stack provides HTTP traffic logging and WAF capabilities respectively; however, isolated analysis of these two sources fails to detect complex multi-stage attacks effectively. This paper proposes and investigates a method for correlating events from Nginx web server access logs and ModSecurity WAF audit logs for timely detection and prevention of cyber incidents in web applications. A four-component correlation system architecture is developed: a log normalization module (parser.py), an event enrichment module (MaxMind GeoIP2), a correlation engine (correlator.py) with a sliding window mechanism based on collections.deque with $O(1)$ insertion/deletion complexity, and a response module (elastic_writer.py). The deterministic linking key X-Request-ID achieves 100% join accuracy across 494,942 transactions. A library of 8 YAML-defined correlation rules covering OWASP Top 10 attack patterns is developed, including a novel WAF Bypass detection rule that identifies cases where ModSecurity issues a block decision while Nginx returns HTTP 200 – a class of incidents undetectable by any baseline approach. Experimental evaluation on a synthetic dataset of 494,942 events (19,680 attack events, 3.97%) simulating 15 days of real web server operation confirmed the effectiveness: F1-score of 0.943 (+14.3% vs baseline), false positive rate of 2.7% (–55.7%), and mean time to detect reduced from 4.2 to 1.8 minutes (–57.1%). The proposed solution operates entirely on open-source software without requiring commercial SIEM licenses.

Keywords: web application, event correlation, WAF, event log, SIEM, cyber incident, attack detection, OWASP Top 10, IDS/IPS, Nginx, ModSecurity, X-Request-ID.

Дата першого надходження статті до видання: 25.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Горба Д.О.<https://orcid.org/0009-0005-0874-8835>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Терейковський І.А.<https://orcid.org/0000-0003-4621-9668>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ У ВІДЕОПОТОЦІ НА МОБІЛЬНИХ ПЛАТФОРМАХ

У статті проведено комплексний та системний аналіз сучасних технічних рішень та наукових систем для розпізнавання об'єктів у відеопотоці в реальному часі на мобільних та вбудованих платформах. Актуальність даного дослідження зумовлена експоненційним зростанням попиту на інтелектуальні мобільні додатки у сферах доповненої реальності, автоматизації, безпеки та робототехніки, функціонування яких критично залежить від здатності ефективно аналізувати візуальну інформацію безпосередньо на пристрої. З метою об'єктивного порівняння існуючих підходів у роботі теоретично обґрунтовується та практично формується уніфікована система критеріїв для оцінювання технологій комп'ютерного зору (Computer Vision). Запропонований набір параметрів охоплює ключові експлуатаційні та функціональні вимоги: продуктивність (швидкість обробки кадрів), точність детектування, вимоги до апаратних ресурсів (CPU, GPU, пам'ять), простоту інженерної інтеграції, автономність роботи та гнучкість адаптації до нових, кастомних об'єктів. На основі розроблених критеріїв у статті детально та критично розглянуто як високорівневі системні фреймворки (Google ML Kit, Apple Core ML), так і архітектурні особливості провідних легковагих згорткових нейронних мереж (сімейства YOLO, MobileNet, EfficientDet), представлених у сучасних наукових працях. У результаті проведеного порівняльного аналізу виявлено ключову науково-практичну проблему – виражену поляризацію існуючих рішень: високоточні, але обчислювально важкі моделі не відповідають жорстким апаратним обмеженням мобільних пристроїв, тоді як швидкі та оптимізовані локальні алгоритми часто поступаються в точності, особливо при детектуванні малих або частково перекритих об'єктів. На відміну від пропозиції єдиного гібридного підходу, дана робота вирішує цю суперечність шляхом створення комплексної аналітичної бази. Вона систематизує наявні технології та надає розробникам структуровану методологію для здійснення обґрунтованого вибору між різними інструментами та архітектурами. Такий підхід дозволяє підібрати оптимальне збалансоване рішення, що найкращим чином відповідає специфічним вимогам конкретного завдання, забезпечуючи необхідний компроміс між швидкістю, точністю та енергоефективністю в умовах парадигми граничних обчислень (Edge AI).

Ключові слова: розпізнавання об'єктів, мобільні платформи, Computer Vision, глибоке навчання, YOLO, TensorFlow Lite, Edge AI, порівняльний аналіз.

Постановка проблеми. У сучасному цифровому світі мобільні пристрої стали основною платформою для впровадження технологій штучного інтелекту. Застосунки, що вимагають аналізу відео в реальному часі, набувають дедалі більшої популярності, проте їхня ефективність напряму залежить від можливості запускати складні моделі глибокого навчання на пристроях з обмеженими обчислювальними ресурсами, пам'яттю та зарядом батареї.

Це створює фундаментальну проблему вибору: розробники змушені шукати компроміс між високоточними, але повільними моделями, та швидкими, але менш точними. Існуючі технічні та наукові рішення пропонують широкий спектр інструментів, однак відсутність їх єдиної систематизації та порівняльного аналізу за уніфікованими критеріями ускладнює вибір оптимальної технології. На цьому ґрунтується актуальність проведення комплексного аналізу сучасних засобів

розпізнавання об'єктів для мобільних платформ з метою надання розробникам науково обґрунтованих рекомендацій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Стрімкий розвиток мобільних технологій та мініатюризація обчислювальних пристроїв перетворили смартфони та інші портативні гаджети на потужні платформи для вирішення завдань штучного інтелекту. Однією з найактуальніших задач є розпізнавання об'єктів у відеопотоці в реальному часі. Ця технологія відкриває широкі можливості для створення інноваційних додатків у сферах доповненої реальності, автоматизації торгівлі, систем безпеки, допомоги водіям та моніторингу стану здоров'я.

Однак розгортання глибоких нейронних мереж на пристроях з обмеженими ресурсами (процесор, пам'ять, заряд батареї) є значним викликом. Розробники змушені шукати компроміс між точністю моделі та швидкістю її роботи. У відповідь на цей виклик з'явилася велика кількість готових технічних рішень, фреймворків та наукових праць, що пропонують оптимізовані системи для мобільного детектування.

Постановка завдання. Метою даної роботи є проведення комплексного аналізу та порівняння сучасних готових технічних та наукових рішень для розпізнавання об'єктів у відеопотоці на мобільних платформах. Аналіз допоможе визначити їхні сильні та слабкі сторони, а також надати рекомендації щодо вибору оптимальної технології для конкретних практичних завдань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У цьому розділі ми проведемо послідовний аналіз 20 ключових рішень: 5 технічних фреймворків та 15 комплексних наукових систем. Кожен пункт у тексті відповідає номеру в списку використаних джерел.

Аналіз сучасних технологій розпізнавання об'єктів на мобільних платформах доцільно розпочати з розгляду фундаментальних технічних рішень, які слугують інструментальною базою для розробників. На ринку домінують два підходи: високорівневі API, що забезпечують простоту інтеграції, та низькорівневі фреймворки, що надають максимальну гнучкість.

До першої групи належать системні рішення від провідних технологічних гігантів. Google ML Kit [1] є кросплатформовим набором інструментів, який дозволяє швидко інтегрувати готові моделі для детектування та відстеження об'єктів з мінімальними зусиллями. Аналогічну роль в екосистемі Apple відіграє зв'язка Core ML та Vision [2],

яка забезпечує максимальну продуктивність та енергоефективність завдяки глибокій апаратній оптимізації під фірмові процесори та нейронний рушій Neural Engine. Ці рішення є ідеальними для швидкого прототипування та додатків, що не вимагають унікальних архітектур.

На противагу їм, низькорівневі фреймворки, такі як TensorFlow Lite (TFLite) [3] та PyTorch Mobile [4], надають розробникам повний контроль над моделями та процесом обробки даних. Вони дозволяють розгортати власні, кастомні архітектури, оптимізовані під конкретні завдання, що є критично важливим для створення наукоємних та високоспеціалізованих продуктів. Важливу допоміжну роль у цій екосистемі відіграє бібліотека OpenCV for Mobile [5], яка, хоч і не є фреймворком для глибокого навчання, надає незамінний інструментарій для попередньої обробки відеопотоку та може самостійно запускати оптимізовані моделі у своєму DNN-модулі.

Переходячи до конкретних наукових реалізацій, що демонструють практичне застосування цих фреймворків, варто виділити домінування архітектур сімейства YOLO. Їхня популярність зумовлена вдалим балансом між швидкістю та точністю. Наприклад, у статті [6] описано систему моніторингу дорожнього руху, де модель YOLOv4-Tiny, розгорнута на мікрокомп'ютері Raspberry Pi 4, досягає продуктивності ~9 FPS, що є достатнім для підрахунку транспортних засобів. Для завдань, що вимагають вищої швидкості, як-от моніторинг носіння захисних масок в реальному часі, у роботі [7] запропоновано Android-додаток на базі YOLOv5s, який на смартфоні Google Pixel 4 показує 22 FPS. Подальший розвиток архітектури демонструється у статті [8], де система виявлення бур'янів на базі YOLOv7-tiny, встановлена на дроні з комп'ютером NVIDIA Jetson Nano, працює зі швидкістю 18 FPS. Для промислової автоматизації, зокрема для детектування дефектів на виробничій лінії, у роботі [9] успішно застосовано покращену модель YOLOX-Nano. Навіть у соціально значущих проєктах, як-от мобільний додаток для допомоги людям з вадами зору, архітектура Gold-YOLO [10] дозволяє досягти 30 FPS на смартфоні, забезпечуючи плавний досвід для користувача.

Іншим популярним сімейством архітектур, розроблених спеціально для мобільних пристроїв, є MobileNet та EfficientDet. Вони роблять акцент на максимальну енергоефективність. Так, у статті [11] описано додаток для діагностики хвороб рослин, що використовує комбіна-

цію MobileNetV2 та SSD-детектора для точного аналізу зображень листя на смартфонах середнього класу. Для завдань автоматизації торгівлі, як-от інвентаризація товарів на полицях, у роботі [12] застосовано модель SSDLite з базовою мережею MobileNetV3, що дозволяє сканувати полиці в русі зі швидкістю 25 FPS. Коли ж пріоритетом є максимальна точність, звертаються до моделей сімейства EfficientDet. У дослідженні [13] проводиться всебічне тестування EfficientDet-Lite на мобільних пристроях, демонструючи високі показники mAP на складних наборах даних. Навіть для пристроїв з мінімальними ресурсами, як-от Raspberry Pi Zero W, найлегша модель EfficientDet-Lite0 може ефективно вирішувати завдання моніторингу заповненості смітєвих баків [14].

Окрім мейнстрімних архітектур, існує низка вузькоспеціалізованих наукових рішень. У статті [15] для розпізнавання жестів рук у реальному часі автори пропонують власну легковагу згорткову нейронну мережу (CNN), що досягає 45 FPS на NVIDIA Jetson Nano. Для критично важливих завдань, як-от розробка систем допомоги водієві (ADAS), у роботі [16] представлена ефективна система виявлення пішоходів для вбудованих автомобільних платформ. Навіть у такій специфічній галузі, як моніторинг морської фауни, система YOLO-Fish [17] на базі YOLOv4 демонструє можливість ідентифікувати види риб у їхньому природному середовищі. Для екстремальних апаратних обмежень, як-от мікроконтролери, у статті [18] описано застосування архітектури

SqueezeNet для детектування облич на платформі ESP32-CAM з продуктивністю 1-2 FPS.

Нарешті, останнім трендом є адаптація трансформерних архітектур для мобільних пристроїв. У дослідженні [19] показано, що гібридна модель MobileViT, яка поєднує згорткові шари та трансформерні блоки, демонструє переваги у детектуванні малих об'єктів порівняно з класичними CNN. Для завдань доповненої реальності, де потрібне не тільки виявлення, але й точне окреслення контурів об'єкта, у роботі [20] успішно застосовується модель Mask R-CNN, що дозволяє реалістично інтегрувати віртуальні об'єкти в реальний світ.

Порівняльний аналіз. Для об'єктивного порівняння всіх 20 розглянутих рішень ми використаємо шість ключових критеріїв. Кожне рішення оцінюється за шкалою, де 1 означає, що воно добре відповідає критерію, 0.5 – частково відповідає, і 0 – не відповідає.

Обґрунтування оцінок.

Продуктивність та вимоги до ресурсів: *Технічні рішення:* Apple Core ML & Vision [2] отримує найвищу оцінку (1) завдяки глибокій апаратній оптимізації. TFLite [3] та PyTorch Mobile [4] (1) є дуже продуктивними, але кінцевий результат залежить від моделі та оптимізацій. ML Kit [1] (0.5) є зручним, але може поступатися в швидкості низькорівневим аналогам. *Наукові рішення:* Рішення, що показують високу продуктивність (18-45 FPS), отримують оцінку (1). Системи з низькою, але прийнятною для їхніх завдань швидкістю, отримують (0.5). Рішення для мікро-

Таблиця 1

Порівняння технічних рішень (1-5)

Критерій	1. Google ML Kit	2. Apple Core ML & Vision	3. TensorFlow Lite	4. PyTorch Mobile	5. OpenCV for Mobile
Продуктивність	0.5	1	1	1	0.5
Точність	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Адаптація до нових об'єктів	1	1	1	1	1
Простота інтеграції	1	1	0.5	0.5	0
Вимоги до ресурсів	0.5	1	0.5	0.5	0.5
Автономність	1	1	1	1	1

Таблиця 2

Порівняння наукових рішень (6-10)

Критерій	6. YOLOv4-T (Traffic)	7. YOLOv5s (Masks)	8. YOLOv7-t (Weeds)	9. YOLOX-N (Defects)	10. Gold-YOLO (Vision Aid)
Продуктивність	0.5	1	1	0.5	1
Точність	1	1	1	1	0.5
Адаптація до нових об'єктів	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Простота інтеграції	0	0	0	0	0
Вимоги до ресурсів	0.5	1	0.5	0.5	1
Автономність	1	1	1	1	1

Таблиця 3

Порівняння наукових рішень (11-15)

Критерій	11. MNetV2 (Plants)	12. MNetV3 (Inventory)	13. EfficDet-L (Benchmark)	14. EfficDet-L0 (Bins)	15. CNN (Gestures)
Продуктивність	1	1	1	0	1
Точність	1	0.5	1	1	1
Адаптація до нових об'єктів	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Простота інтеграції	0	0	0	0	0
Вимоги до ресурсів	1	1	1	1	0.5
Автономність	1	1	1	1	1

Таблиця 4

Порівняння наукових рішень (16-20)

Критерій	16. CNN (ADAS)	17. YOLO-Fish	18. SqueezeNet (IoT)	19. MobileViT (Small Obj.)	20. Mask R-CNN (AR)
Продуктивність	1	1	0	1	0.5
Точність	1	1	0.5	1	1
Адаптація до нових об'єктів	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Простота інтеграції	0	0	0	0	0
Вимоги до ресурсів	0.5	0.5	1	1	0.5
Автономність	1	1	1	1	1

контролерів [18] з продуктивністю 1-2 FPS отримують (0), оскільки не підходять для відеопотоку в реальному часі.

Точність: *Технічні рішення:* Усі фреймворки (1-5) отримують (0.5), оскільки точність повністю залежить від моделі, яку в них завантажують, а не від самого фреймворку. *Наукові рішення:* Системи, що демонструють високу точність (понад 90%) або високий mAP для складних датасетів, отримують (1). Інші, де точність є достатньою, але не рекордною, отримують (0.5).

Адаптація до нових об'єктів: *Технічні рішення:* Усі фреймворки (1-5) отримують найвищу оцінку (1), оскільки їхнє головне призначення – дозволяти розробникам використовувати власні, кастомні моделі. *Наукові рішення:* Усі наукові праці (6-20) отримують (0.5). Хоча в основі лежать моделі, які можна перенавчити, самі статті представляють собою кінцеве рішення для конкретного завдання. Адаптація вимагає від розробника самостійного повторення всього процесу дослідження: збору даних, навчання моделі та її оптимізації.

Простота інтеграції: *Технічні рішення:* ML Kit [1] та Core ML [2] (1) є беззаперечними лідерами, оскільки надають високорівневі API. TFLite [3] та PyTorch Mobile [4] (0.5) вимагають значно більше коду для налаштування. OpenCV [5] (0) є найскладнішим для інтеграції в якості основного рушія. *Наукові рішення:* Усі наукові праці (6-20) отримують (0), оскільки не є готовими бібліоте-

ками, тому їх не можна "інтегрувати". Вони є описом системи, яку потрібно відтворювати з нуля.

Автономність: Усі 20 розглянутих рішень отримують оцінку (1), оскільки вони розроблені або можуть бути розгорнуті для роботи повністю на кінцевому пристрої без необхідності підключення до інтернету.

Висновки. Проведений аналіз 5 технічних та 15 наукових рішень дозволяє зробити наступні висновки:

Вибір між простотою та гнучкістю: Для швидкого старту та розробки додатків із типовими завданнями детектування найкращим вибором є високорівневі API Google ML Kit [1] та Apple Core ML [2]. Якщо ж проєкт вимагає максимальної гнучкості, повного контролю над процесом обробки та використання складних кастомних моделей, перевагу слід віддати TensorFlow Lite [3] або PyTorch Mobile [4].

Наукові рішення як орієнтир: Проаналізовані наукові статті демонструють величезний потенціал сучасних архітектур. Вони слугують не готовими інструментами, а дорожньою картою для розробників, показуючи, яких результатів з точності та продуктивності можна досягти на конкретному "залізі" при вирішенні певного завдання.

Немає універсального рішення: Вибір оптимальної технології завжди є компромісом. Для систем моніторингу, де швидкість не є критичною, можна використовувати більш точні, але повільні моделі. Для додатків реального часу, як-от AR

чи допомога водієві, пріоритетом є максимальна продуктивність (FPS). А для пристроїв інтернету речей, як-от мікроконтролери [18], існують ультра-легкі моделі, які здатні працювати в умовах екстремальних обмежень.

Таким чином, розробник повинен чітко визначити пріоритети свого проєкту (швидкість, точність, час розробки, цільова платформа) і на основі цього робити вибір, використовуючи представлений аналіз як основу для прийняття рішення.

Список літератури:

1. Google. "ML Kit: Production-ready ML for mobile developers." <https://developers.google.com/ml-kit>
2. Apple. "Core ML: Integrate machine learning models into your app." <https://developer.apple.com/documentation/coreml>
3. TensorFlow. "TensorFlow Lite: Deploy machine learning models on mobile and edge devices." <https://www.tensorflow.org/lite>
4. PyTorch. "PyTorch Mobile: End-to-end workflow from Python to mobile devices." <https://pytorch.org/mobile/>
5. OpenCV. "OpenCV - Open Source Computer Vision Library." <https://opencv.org/>
6. Putra, A. et al. "Real-Time Vehicle Detection and Counting on Raspberry Pi using YOLOv4-Tiny and OpenVINO." *2022 International Conference on Information Technology Systems and Innovation (ICITSI)*.
7. Li, D. et al. "A Real-Time Face Mask Detection Method Based on YOLOv5s in Mobile Terminal." *2022 IEEE 6th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*.
8. Li, Y. et al. "A real-time weed detection system in paddy fields using YOLOv7-tiny and its deployment on a Jetson Nano-based drone." *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 206, 2023.
9. Chen, W. et al. "A Lightweight Defect Detection Model for Industrial Products Based on Improved YOLOX-Nano." *Electronics*, 11(15), 2022.
10. Wang, C. et al. "Gold-YOLO: A Novel Gold-Fusion-Based Object Detector for Aiding Visually Impaired People." *Sensors*, 2023.
11. Barbedo, J.G.A. "Plant disease identification from individual lesions and spots using deep learning." *Biosystems Engineering*, Vol. 180, 2019.
12. Patel, C. et al. "Automated Retail Store Shelf Monitoring using MobileNetV3." *2021 International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS)*.
13. Pang, J. et al. "Benchmarking Real-Time Object Detection on Mobile Devices: A Comprehensive Analysis of EfficientDet-Lite." *Journal of Real-Time Image Processing*, 19, 2022.
14. Ben-jdira, B. et al. "Smart Garbage Bin Monitoring System Using an EfficientDet-Lite0 Model." *2023 International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE)*.
15. Kopuk, S. et al. "Real-Time Hand Gesture Recognition System on Edge Devices Using Lightweight CNNs." *IEEE Access*, 10, 2022.
16. Kim, J. et al. "An Efficient Pedestrian Detection System for Embedded Automotive Platforms." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(7), 2022.
17. Jalal, A., Salman, A., Mian, A. et al. "YOLO-Fish: A robust fish species identification and localization model." *Scientific Reports*, 12, 2022.
18. Lin, C. et al. "Face Detection on ESP32-CAM using a SqueezeNet-based Model." *2021 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW)*.
19. Sayed, G. I. et al. "Applying Mobile Vision Transformers for Small Object Detection on Mobile Devices." *IEEE Access*, 11, 2023.
20. Hati, S. et al. "Instance-aware 3D Object Placement in Augmented Reality using Mask R-CNN." *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*.
21. Tereikovskiy I. A., Didus A. V. A model for keyword spotting in voice signal for specialized computer systems. *Herald of Advanced Information Technology*. 2025. Vol. 8, No 3. P. 341–351. DOI: 10.15276/hait.08.2025.22.
22. Терейковська Л. О. Методологія автоматизованого розпізнавання емоційного стану слухачів системи дистанційного навчання : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.06. Київ, 2022. 40 с. URL: http://diser.ntu.edu.ua/Tereikovska_aref.pdf (дата звернення: 03.03.2026).

Horba D.O., Tereikovskiy I.A. ANALYSIS OF OBJECT DETECTION TECHNOLOG IN VIDEO STREAMS ON MOBILE PLATFORMS

The article provides a comprehensive and systematic analysis of modern technical solutions and scientific systems for real-time object detection in video streams on mobile and embedded platforms. The relevance of this study is driven by the exponential growth in demand for intelligent mobile applications in the fields of

augmented reality, automation, security, and robotics, whose functionality critically depends on the ability to efficiently analyze visual information directly on the device. To objectively compare existing approaches, the paper theoretically substantiates and practically develops a unified system of criteria for evaluating computer vision technologies. The proposed set of parameters covers key operational and functional requirements: performance (frame processing speed), detection accuracy, hardware resource requirements (CPU, GPU, memory), ease of engineering integration, operational autonomy, and flexibility in adapting to new, custom objects. Based on the developed criteria, the article provides a detailed and critical review of both high-level system frameworks (Google ML Kit, Apple Core ML) and the architectural features of leading lightweight convolutional neural networks (YOLO, MobileNet, EfficientDet families) presented in modern scientific papers. As a result of the comparative analysis, a key scientific and practical problem is identified—the pronounced polarization of existing solutions: highly accurate but computationally heavy models do not meet the strict hardware constraints of mobile devices, whereas fast and optimized local algorithms often compromise on accuracy, especially when detecting small or partially occluded objects. Instead of proposing a single hybrid approach, this work resolves this contradiction by creating a comprehensive analytical framework. It systematizes existing technologies and provides developers with a structured methodology for making an informed choice between different tools and architectures. This approach allows for the selection of an optimal balanced solution that best meets the specific requirements of a particular task, ensuring the necessary trade-off between speed, accuracy, and energy efficiency within the Edge AI paradigm.

Keywords: object detection, mobile platforms, Computer Vision, deep learning, YOLO, TensorFlow Lite, Edge AI, comparative analysis.

Дата першого надходження статті до видання: 14.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Goyushova U.M.<https://orcid.org/0000-0002-3646-4937>

Institute of Mathematics

STRUCTURAL VISION-BASED UAV NAVIGATION USING HESS MATRIX AND B-SPLINE MODELING

This article presents a structural approach to the vision-based navigation of unmanned aerial vehicles (UAVs) based on the detection, parametric modeling, and comparison of curvilinear objects extracted from aerial images. In contrast to conventional image-matching techniques that rely directly on pixel-level intensity values or raw visual appearance, the proposed method represents objects through their geometric and structural characteristics. Such a representation reduces the influence of scale variation, translation, partial viewpoint changes, and other distortions that often degrade the reliability of direct image comparison in real navigation scenarios. As a result, the method is more robust and better adapted to UAV operation in environments where the appearance of observed objects may change significantly.

A central component of the proposed approach is the selection of control points for B-spline approximation using the Hessian matrix. Hessian-based analysis makes it possible to identify the most informative contour points by evaluating the local second-order structure of the image and emphasizing regions with significant curvature changes. This allows the extraction of essential structural elements of curvilinear objects while suppressing redundant or less informative details. The selected points are then used to construct a B-spline model that provides a smooth, compact, and stable parametric representation of object shape.

The combination of Hessian-based point selection and B-spline modeling forms a mathematically grounded framework for the reliable description, comparison, and identification of curvilinear objects. A distinctive feature of the proposed method is that comparison is performed not on the original images themselves, but on spline curves and their characteristic parameters. This significantly reduces computational complexity and increases interpretability. Owing to its structural nature, the method is particularly suitable for UAV navigation tasks in which lightweight, robust, and invariant object representation is required for matching current observations with previously stored reference data and for supporting accurate localization in visually complex scenes.

Keywords: UAV, vision-based navigation, viewpoint invariance, Hessian matrix, B-spline, curve detection, OpenCV.

Formulation of the problem. In vision-based UAV navigation, one of the key tasks is the comparison of visual objects extracted from the current frame with previously stored reference images or structural models. For this purpose, geometric features of roads, rivers, boundary lines, and other elongated objects can be used. Since such objects provide more stable visual landmarks along the route, extracting their contour and curvature characteristics helps improve localization accuracy. Especially in GNSS-denied environments, representation methods based on structural features are considered both computationally efficient and suitable for real-time comparison [1].

Analysis of recent research and publications. Detecting curvilinear structures in digital images is one of the important theoretical and applied problems in digital image processing and computer vision.

Since curves represent object boundaries, contours, trajectories, and shape characteristics, their reliable extraction is essential for object recognition, shape analysis, medical image processing, cartographic data extraction, industrial inspection, and vision-based navigation systems. The separation of linear and curvilinear structures plays a particularly important role in the extraction of objects such as roads, shorelines, canals, and riverbeds from images [2].

Classical approaches to edge and contour detection in images are primarily based on first-order derivative gradient methods. In this context, the edge detector proposed by Canny is considered one of the most widely used methods. This approach defines precise criteria for edge point extraction and aims to optimize edge detection with respect to detection accuracy, localization, and the reduc-

tion of false responses. However, gradient-based operators mainly detect sharp intensity changes and therefore identify the presence of an edge; the local behavior of a curve, its degree of curvature along a direction, and the second-order structural variation of the image are not fully represented by these methods [3].

For more accurate detection of curvilinear structures, methods based on second-order derivatives occupy an important place in the literature. In this regard, the Hessian matrix provides richer information about local curvature, directional variation, and extremum properties. One of the classical studies devoted to the extraction of curvilinear structures is the work of Steger, which demonstrated that the detection of such structures is one of the basic low-level operations in computer vision and has numerous applications [4]. At the same time, Frangi and co-authors proposed an effective approach for enhancing vessel-like structures through multiscale analysis based on the eigenvalues of the Hessian matrix, confirming the practical value of second-order local structural analysis [5].

Contour points extracted from an image are often scattered and unstable because of noise, illumination changes, pixel discretization, and edge detection errors. For this reason, it is more appropriate to represent the shape of an object not by a rigid curve passing through all points, but by a smoother and more stable parametric model. In this context, spline methods, especially B-splines, are regarded as efficient tools both theoretically and practically. De Boor systematized spline theory from a computational point of view and justified the representation of splines as weighted sums of B-splines [6]. Dierckx, in turn, described in detail the algorithmic and mathematical foundations of curve and surface fitting with splines [7]. These properties explain the advantages of B-spline approximation in terms of local controllability, smoothness, and compact parametric representation [8].

Task statement. Thus, although classical edge detection methods can be employed at the initial stage for the reliable extraction of curves from images, approaches based on second-order derivatives, and especially on Hessian analysis, are more suitable for a fuller description of structural characteristics. Constructing a B-spline approximation from the selected informative points makes it possible to represent the object shape in a more compact, smooth, and comparison-ready form. Therefore, the detection of curves, their modeling by splines, and their subsequent comparison based on struc-

tural parameters can be regarded as a scientifically grounded approach for the identification of visual objects.

Outline of the main material of the study

1.1. Method for detecting curves from images

Curve detection in images is carried out after the preprocessing stage by means of structural analysis based on second-order derivatives. During preprocessing, the image is denoised, converted into grayscale, binarized when necessary, and used to extract edge information [9]. The purpose of this stage is to isolate the informative parts of the image and to form more stable input data for the subsequent analysis.

In order to detect curves more accurately, the local geometric properties of the image are analyzed by means of the Hessian matrix [10]. For the image intensity function $I(x, y)$, the Hessian matrix at the point (x, y) is defined as follows:

$$H(x, y) = \begin{bmatrix} I_{xx}(x, y) & I_{xy}(x, y) \\ I_{yx}(x, y) & I_{yy}(x, y) \end{bmatrix},$$

where I_{xx} and I_{yy} denote the second-order derivatives along the x and y directions, respectively, while $I_{xy} = I_{yx}$ denotes the mixed derivative.

The presence or absence of local curvature at a given point is determined on the basis of the eigenvalues of the Hessian matrix. The eigenvalues are found as the roots of the following characteristic equation:

$$\det(H - \lambda \mathbf{I}) = 0,$$

where H is the Hessian matrix, λ is the eigenvalue, and $\mathbf{I}$ is the identity matrix.

By expanding this expression, the following quadratic equation is obtained:

$$\lambda^2 - (I_{xx} + I_{yy})\lambda + (I_{xx}I_{yy} - I_{xy}^2) = 0.$$

Accordingly, the eigenvalues are computed as

$$\Delta = (I_{xx} + I_{yy})^2 - 4(I_{xx}I_{yy} - I_{xy}^2)$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{(I_{xx} + I_{yy}) \pm \sqrt{\Delta}}{2}$$

The local geometric character of the point is determined from the signs and relative magnitudes of the eigenvalues. In order for curvature to be considered present at the point (x, y) , one of the eigenvalues must be significantly larger than the other, that is, the following condition must hold:

$$|\lambda_1| \gg |\lambda_2|.$$

This condition indicates the presence of dominant curvature in one direction and implies that the point lies on a curve.

In addition, the points are classified according to the signs of the eigenvalues as follows:

- If $\lambda_1 > 0$, $\lambda_2 > 0$, the point is a local minimum;
- If $\lambda_1 < 0$, $\lambda_2 < 0$, the point is a local maximum;
- If $\lambda_1 \cdot \lambda_2 < 0$, the point is a saddle point;
- If $\lambda_1 \approx 0$, $\lambda_2 \approx 0$, the point belongs to a flat region with no curvature.

This classification serves two main purposes: it removes pixels belonging to flat background regions and it identifies the probable direction of the curve together with the zones of strong local variation. Thus, the informative points selected by the Hessian-based analysis are used in the subsequent approximation stage as control points.

1.2. Approximation of splines from images

The contour or road points extracted from an image may be inaccurate and scattered because of illumination changes, noise, shadows, texture, and edge-detection errors under real conditions. Therefore, it is more appropriate to represent the object shape by a smoothed parametric model rather than by a rigid curve passing through all detected points. For this purpose, B-spline approximation is employed.

The general form of a B-spline curve is written as a linear combination of control points and basis functions:

$$Q(u) = \sum_{i=0}^n P_i N_{i,k}(u),$$

where P_i are the control points, $N_{i,k}(u)$ is the B-spline basis function of order k , and u is the parameter.

$$N_{i,k}(u) = \frac{u - t_i}{t_{i+k} - t_i} \cdot N_{i,k-1}(u) + \frac{t_{i+k+1} - u}{t_{i+k+1} - t_{i+1}} \cdot N_{i+1,k-1}(u),$$

$$t_i = 0, 1, \dots, n + k.$$

This representation demonstrates the main advantage of the B-spline method: the basis functions are local over the parameter interval. Consequently, each control point affects only a specific portion of the curve. Therefore, when a local error or discontinuity occurs in one part of the contour, the entire curve is not distorted globally.

The accuracy of B-spline approximation depends directly on the correct selection of control points. If the control points do not adequately reflect the main structure of the contour, the resulting curve may deviate from the actual object shape. For this reason, the control points are formed from the informative points selected by the Hessian matrix. Since points characterized by local curvature and extremum-like behavior represent the main structural properties of the contour, using such points as control points improves both the stability of the approximation and the reliability of the comparison stage.

1.3. Comparison of images by comparing curves

During video-based navigation, the current position of the platform is determined by comparing the observed objects with previously known references [11, 12]. For this purpose, curve-like objects extracted from reference images are modeled by B-splines and their characteristic parameters are stored. The same processing sequence is then applied to the currently observed image in order to construct the corresponding spline. As a result, the problem is formulated not as a comparison of raw images, but as a comparison of spline curves.

In the comparison stage, the control points of the curve are used as the principal features. If r_j denotes the selected features of the observed curve and $r_p(t_j)$ denotes the features of the reference curve, then, in the simplest case, the similarity criterion can be written as

$$d_p^2 = \sum_{j=1}^M r_j - r_p(t_j)^2.$$

The reference curve with the minimum difference is accepted as the matching object.

This corresponds to the simplest comparison case, in which scaling, rotation, and translation are not taken into account.

In the more general case, R rotation, $b = (b_x, b_y)$ translation, and β scaling are applied to the reference points. If the transformed reference points are written as $r_{p,T}(t_j)$, then the correspondence is determined by minimizing the following residual:

$$d_p^2 = \sum_{j=1}^M r_j - r_{p,T}(t_j)^2.$$

Thus, the comparison process is brought into a form that is structurally compact, mathematically grounded, and applicable to navigation tasks.

1.4. Practical implementation and discussion

The practical validation of the proposed approach was carried out in Python using the functions provided by the OpenCV library [13]. As the initial experimental data in Figure 1, a ground surface image obtained from Google Earth was selected, and a sequence of processing stages was applied to this image. The processing pipeline consisted of image preparation, conversion to grayscale, binarization, edge detection, contour extraction, and, at the final stage, spline-based curve approximation.

At the initial stage, the color image was converted into grayscale. After converting grayscale result shows in Figure 2.

In addition to reducing computational complexity, this conversion made it possible to analyze intensity changes more clearly during the subsequent edge-detection stage. The image was then transformed into a

black-and-white binary form. As a result of binarization, the distinction between the object and the background became more explicit, which provided a more suitable representation for contour and boundary extraction.



Fig. 1. A ground surface image obtained from Google Earth



Fig. 2. Grayscale result of Earth surface image

At the next stage, the Canny algorithm was applied to detect edges within the image. The obtained result showed that the main boundary lines of the object became more clearly separated from the background in Figure 3. This stage plays an important role in forming the initial contour representation of curve-like structures. The line structures obtained after edge detection are used as the input data for the subsequent contour extraction step.

Contour extraction was performed using the `findContours()` function of the OpenCV library. As

a result of this operation, continuous curve lines describing the objects in the image were identified. Each detected contour is represented as a sequence of points located along the boundary. This makes it possible to obtain a direct discrete geometric description of the object shape. Such a representation forms the primary data basis for the subsequent spline approximation stage.



Fig. 3. The result obtained in binary format by applying the Canny algorithm

To construct a smooth curve from the extracted contour, the `splprep()` and `splev()` functions of the SciPy library were used. At this stage, a smoothed parametric representation of the curve was obtained on the basis of the contour points. As a result of B-spline approximation, the object boundary was represented not only as a discrete sequence of points, but also as a more stable and structurally compact curve model. The obtained spline representation reduced local irregularities in the contour and revealed the main trajectory more clearly in Figure 4.

The practical results show that the correct sequential application of the preprocessing stages directly affects the quality of the subsequent curve detection and approximation stages. Conversion to grayscale and binarization simplify edge detection, the Canny operator separates the main boundary lines, the `findContours()` function represents these boundaries as discrete contours, and the `splprep()` and `splev()` functions replace these contours with a smooth curve model. Thus, the processing chain ensures the gradual transformation of the raw image into a structurally more informative representation.

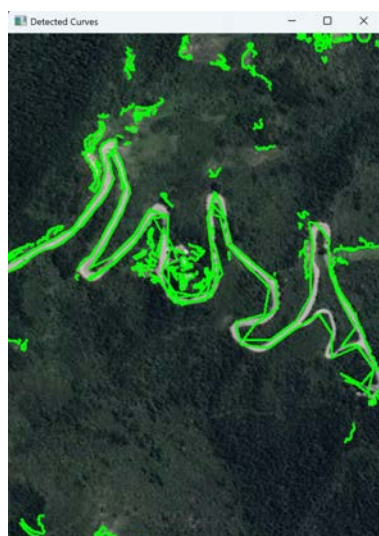


Fig. 4. A representation of the approximated curve in the image via OPENCV

From the standpoint of discussion, the obtained results demonstrate that smoothing discrete contours by means of splines makes the object shape more suitable for comparison. Compared with direct pixel-level or raw contour-point comparison, the spline representation provides a more compact parametric model and therefore creates a basis for simplifying computations in the subsequent identification stage. This can be regarded as an important advantage, especially in vision-based navigation problems where curve-like objects are compared with reference patterns.

At the same time, since the quality of the contour depends on the outcome of the initial preprocessing, the construction of the final curve is also determined by the accuracy of these stages. If the boundary of the object is extracted incompletely or is distorted by noise during edge detection, the sequence of contour

points will also become unstable, and this will affect the quality of spline approximation. For this reason, preprocessing, edge detection, and contour extraction should be considered the main stages that determine the reliability of the resulting spline representation.

Thus, the program implementation demonstrates that the extraction of curve-like structures from ground surface images and their approximation by a smooth curve can be practically realized using OpenCV and SciPy tools. The obtained results indicate that the method is structurally workable and creates an appropriate mathematical basis for subsequent curve-based comparison and identification stages.

Conclusions. This study presents an approach for the identification of visual objects based on the detection of curvilinear structures in images and their parametric representation. The main advantage of the proposed method is that objects are described not at the direct pixel level, but at the level of structural features. This makes it possible to reduce the influence of scale, position, and viewpoint differences during comparison, that is, to achieve a more invariant representation of the image.

A key aspect of the approach is the selection of control points for B-spline approximation using the Hessian matrix. The use of Hessian-based analysis makes it possible to take local curvature properties into account and to identify the most informative points of the contour. As a result, the B-spline model represents the main shape of the object in a more accurate, smooth, and stable manner.

Thus, the determination of informative points by means of the Hessian matrix, together with the B-spline representation constructed from these points, provides an appropriate mathematical basis for more reliable comparison and identification of curvilinear objects.

Bibliography

1. Yue-hua S., Yuan-li C. Image Feature Extraction for Vision-Based UAV Navigation. In 2018 Chinese Automation Congress (CAC), Xi'an, China, -2018, pp.1130-1134, Doi: 10.1109/CAC.2018.8623264.
2. Parker J.R. Algorithms for Image Processing and Computer Vision, second edition, Wiley Publishing, Inc, pp.21-251.
3. Canny J. A Computational Approach to Edge Detection. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8(6), 679-698, 1986.
4. Steger C. An Unbiased Detector of Curvilinear Structures. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 20(2), 113-125, 1998.
5. Frangi A. F., Niessen W. J., Vincken K. L. et al. Multiscale Vessel Enhancement Filtering. In: Wells, W. M., Colchester, A., Delp, S. (eds.), MICCAI '98, Lecture Notes in Computer Science, vol. 1496, pp. 130-137, Springer, 1998.
6. de Boor, C. A Practical Guide to Splines. Springer, revised edition, 2001.
7. Dierckx P. Curve and Surface Fitting with Splines. Oxford University Press / Clarendon Press, 1993.
8. Van, T.D., Tegoeh, T. A direct method to solve optimal knots of B-spline curves: An application for non-uniform B-spline curves fitting. Singapore: PLOS one, - 2017. Vol.12, № 3, -p.1-24.

9 Reinhard K. Concise Computer Vision, An Introduction into Theory and Algorithms. New Delhi: Springer-Verlag London, first edition. 2014. 429 p.

10 Kong Y., Liu L., Chen H., Kacprzyk J., Tao D. Overcoming Catastrophic Forgetting in Continual Learning by Exploring Eigenvalues of Hessian Matrix. in IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, vol. 35, no. 11, pp. 16196-16210, Nov. 2024, doi: 10.1109/TNNLS.2023.3292359.

11 Sabziev E.N. Determining the location of an unmanned arial vehicle based on video camera images. Baku: Advanced Information Systems, 2021. vol.5. No1. p.136-139.

12 Goyushova U. Determining the location of a moving device based on video images. *Informatics and Control Problems*. 2024. 44(2). 51-57. Doi: 10.54381/icp.2024.2.06

13 Kaehler A., Bradski G. Learning OpenCV 3: Computer Vision in C++ with the OpenCV Library. O'Reilly Media. 2017.

Гоюшова У.М. СТРУКТУРНО-ОРІЄНТОВАНА НАВІГАЦІЯ БПЛА НА ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ МАТРИЦІ ГЕССЕ ТА В-СПЛАЙН-МОДЕЛЮВАННЯ

У статті представлено структурний підхід до навігації безпілотних літальних апаратів (БПЛА) на основі комп'ютерного зору, який ґрунтується на виявленні, параметричному моделюванні та порівнянні криволінійних об'єктів, виділених з аерофотознімків. На відміну від традиційних методів зіставлення зображень, що безпосередньо використовують інтенсивність пікселів або первинний візуальний вигляд, запропонований метод представляє об'єкти через їхні геометричні та структурні характеристики. Такий підхід зменшує вплив змін масштабу, зсуву, часткових змін точки спостереження та інших спотворень, які часто знижують надійність прямого порівняння зображень у реальних умовах навігації. У результаті метод є більш стійким і краще адаптованим до роботи БПЛА в середовищах, де зовнішній вигляд об'єктів може суттєво змінюватися.

Центральним елементом запропонованого підходу є вибір контрольних точок для апроксимації В-сплайном із використанням матриці Гессе. Аналіз на основі матриці Гессе дає змогу визначити найбільш інформативні точки контуру шляхом оцінювання локальної структури другого порядку зображення та виділення ділянок зі значними змінами кривини. Це забезпечує вилучення ключових структурних елементів криволінійних об'єктів при одночасному пригніченні надлишкових або менш інформативних деталей. Відібрані точки використовуються для побудови В-сплайн-моделі, яка забезпечує гладке, компактне та стабільне параметричне представлення форми об'єкта.

Поєднання вибору точок на основі матриці Гессе та В-сплайн-моделювання формує математично обґрунтовану основу для надійного опису, порівняння та ідентифікації криволінійних об'єктів. Відмінною рисою запропонованого методу є те, що порівняння виконується не між вихідними зображеннями, а між сплайновими кривими та їх характерними параметрами. Це суттєво зменшує обчислювальну складність і підвищує інтерпретованість результатів. Завдяки своїй структурній природі метод особливо придатний для задач навігації БПЛА, де потрібне легке, стійке та інваріантне представлення об'єктів для зіставлення поточних спостережень із раніше збереженими еталонними даними та для забезпечення точної локалізації у візуально складних сценах.

Ключові слова: БПЛА, навігація на основі комп'ютерного зору, інваріантність до точки спостереження, матриця Гессе, В-сплайн, виявлення кривих, OpenCV.

Дата першого надходження статті до видання: 16.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

УДК 004.056:004.75:004.89

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.1/10>

Єрошенко О.А.

<https://orcid.org/0000-0001-6221-7158>

Харківський національний університет радіоелектроніки

Федорченко В.М.

<https://orcid.org/0000-0001-7359-1460>

Харківський національний університет радіоелектроніки,

Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця

Партика С.О.

<https://orcid.org/0000-0002-7376-8980>

Харківський національний університет радіоелектроніки

Пивоварова Д.І.

<https://orcid.org/0000-0002-7251-994X>

Харківський національний університет радіоелектроніки

МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ DDOS-АТАК НА КОНТРОЛЕР SDN НА ОСНОВІ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ЕНТРОПІЇ ВИЩОГО ПОРЯДКУ

Статтю присвячено вирішенню актуальної проблеми забезпечення безпеки програмно-конфігурованих мереж (SDN), зокрема захисту рівня управління мережі від розподілених атак на відмову в обслуговуванні (DDoS). Унікальна архітектура SDN, що відокремлює площину управління від площини даних, робить централізований контролер критичною точкою відмови та головною мішенню для зловмисників, оскільки перевантаження ресурсу Packet-In призводить до повної деградації мережі.

У роботі проаналізовано недоліки існуючих методів статистичного аналізу, які зазвичай фокусуються лише на множенні IP-адрес без урахування динамічних часових факторів, що робить їх вразливими до складних стратегій атак, таких як інтелектуальний спуфінг. Авторами запропоновано вдосконалений метод виявлення DDoS-атак, що базується на використанні інформаційної ентропії вищого порядку та статистичної моделі розподілу Пуассона. Суть методу полягає в прецизійному аналізі швидкості потоку пакетів у межах фіксованих часових вікон. Моделювання процесу надходження запитів як пуассонівського процесу дозволяє точніше ідентифікувати аномальні коливання трафіку: за нормальних умов ентропія залишається стабільно високою через статистичну випадковість потоків, тоді як під час атаки вона стрімко падає внаслідок штучної концентрації трафіку на конкретних вузлах.

Експериментальна перевірка методу проводилася з використанням розгалуженої топології в емуляторі Mininet, комутатора Open vSwitch та контролера Ryu. Результати моделювання підтвердили, що запропонований підхід забезпечує вищу точність детектування та суттєво менший рівень обчислювальних помилок для різних стратегій атак порівняно з традиційними рішеннями. Встановлено, що оптимальним для стабільного виявлення аномалій є часове вікно тривалістю 10 секунд. Додатково впроваджена система «кредитів довіри» для IP-адрес дозволяє ефективно фільтрувати шкідливий трафік на рівні граничних комутаторів, зберігаючи дефіцитні ресурси контролера для обслуговування легітимних запитів, що гарантує високу доступність та стійкість мережевої інфраструктури навіть в умовах інтенсивного кібервпливу.

Ключові слова: програмно-конфігуровані мережі, контролер SDN, DDoS-атаки, інформаційна ентропія, розподіл Пуассона, кібербезпека, часове вікно, експоненційне згладжування.

Постановка проблеми. У сучасному цифровому середовищі мережеві загрози набувають дедалі більшого поширення. Розподілені атаки на відмову в обслуговуванні (DDoS), продовжують створювати серйозні виклики. Для забезпечення сталої роботи різноманітних сервісів вкрай важливо посилити мережевий захист та підвищити загальний рівень безпеки. Серед численних передових заходів безпеки яскраво виділяється стратегія захисту на основі програмно-конфігурованих мереж (SDN), яка стала зразком для впровадження інтелектуального та гнучкого управління безпекою.

Унікальна архітектура SDN відокремлює площину управління від площини даних. Цей підхід наділяє управління та контроль мережевим трафіком гнучкістю й точністю, які раніше були недосяжними. Зіткнувшись із DDoS-атакою, SDN може повною мірою продемонструвати свої можливості. Спираючись на функцію моніторингу в режимі реального часу, вона здатна швидко виявляти аномальні стани трафіку та оперативно налаштовувати механізми реагування. За допомогою SDN персонал з експлуатації та обслуговування систем безпеки може динамічно планувати маршрути трафіку, вміло уникати перевантажених та атакованих ділянок мережі, а також швидко ізолювати шкідливий трафік. Водночас це дозволяє оптимізувати розподіл мережевих ресурсів для гарантованого проходження критично важливого бізнес-трафіку, ефективно протистоячи бурхливим потокам даних (флуду), спричиненим DDoS-атаками [1]. Стратегія підкреслює гнучкість та інноваційність архітектури мережевого захисту й процесів управління безпекою, надаючи персоналу розширені можливості контролю та негайного втручання. Усе це комплексно підвищує стійкість мережевої інфраструктури та мінімізує негативні наслідки від DDoS-атак.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розподілені додатки стають дедалі складнішими, а традиційні мережі – громіздкими. Інтегрована передача даних і управління перешкоджають досягненню високої гнучкості та ефективного розподілу ресурсів в управлінні мережею, створюючи серйозну перешкоду для прогресу.

Наявність прикладного рівня та зв'язок між рівнем управління і рівнем даних значно підвищили програмованість, масштабованість та відкритість мережі завдяки API та «північним» інтерфейсам, що полегшує управління мережею та налаштування додатків [1].

В архітектурі SDN [2] контролер SDN є головною мішенню злоумисників для отримання управ-

ління мережевими ресурсами. DDoS-атака, спрямована на контролер, швидко перевантажує мережу, порушуючи її нормальну роботу та виснажуючи критично важливі ресурси, такі як кеш-пам'ять і пропускна здатність мережевих пристроїв та контролерів. Хоча програмно-конфігуровані мережі (SDN) мають такі механізми протидії DDoS-атакам, як моніторинг, програмоване користувацьке виявлення, візуалізація мережі та контроль деталізації (гранулярності), вони все ще перебувають на стадії становлення, стикаючись із проблемами інтеграції, методами вирішення завдань та питаннями стабільності контролерів [3].

Постановка завдання. Метою статті є створення безпечнішого, ефективнішого та надійнішого мережевого середовища для різноманітних додатків, що має вирішальне значення для подальшого розвитку мережевих технологій.

Виклад основного матеріалу. Архітектурне відокремлення рівня управління від рівня даних у програмно-конфігурованих мережах робить безпеку рівня управління пріоритетною. Модель централізованого управління підкреслює необхідність надійного захисту від DDoS-атак, зокрема тих, що спрямовані на контролери SDN. Виявлення таких атак та захист від них є критично важливими для підтримання стабільної роботи мережі. Визначення пріоритетності безпеки рівня управління є необхідною умовою для забезпечення загальної безпеки та надійності мережі [4].

У сфері програмно-конфігурованих мереж проблема виявлення розподілених атак на відмову в обслуговуванні привертає значну увагу. Існуючі контролери SDN, такі як Nakashima, використовують методи статистичного аналізу для ідентифікації подібних атак. Однак ці методи зосереджені переважно на концентрації IP-адрес джерела та призначення без урахування часових аспектів, що призводить до неповної інтеграції функцій SDN та вразливості до атак. У випадку DDoS-атак на контролери SDN злоумисники часто переповнюють контролер пакетами, що призводить до виснаження його ресурсів. Аналізуючи ентропію IP-інформації, ці методи мають на меті виявити аномалії в паттернах трафіку [5]. Для розширення можливостей виявлення вкрай важливо розробити складніші методи, які враховуватимуть не лише статистичні характеристики, але й часові фактори та специфічні способи спрямування атак на контролери SDN. Поєднуючи ці підходи, дослідники зможуть краще підготувати контролери SDN до протидії DDoS-атакам і забезпечити безпеку та стійкість мережі перед обличчям новітніх кіберзагроз [4].

Для вирішення цієї проблеми запропоновано метод виявлення DDoS-атак на контролери SDN з використанням вищої інформаційної ентропії. Цей підхід зосереджений на ідентифікації унікальних характеристик DDoS-атак на контролери SDN шляхом впровадження системи виявлення швидкості потоку пакетів. Він передбачає передачу даних комутатора до контролера в межах заданого часового вікна, що дозволяє більш ефективно та результативно виявляти DDoS-атаки.

Таким чином, значення ентропії для кожної точки в часовому вікні можуть обчислюватися в режимі реального часу і порівнюватися з обраним пороговим значенням після формування вибірки та аномальної вибірки, щоб визначити, чи зазнає контролер SDN DDoS-атаки. Метод виявлення поєднує патерни зв'язку між комутатором і контролером з аналізом швидкості потоку DDoS-атаки для ефективного і точного виявлення та пом'якшення потенційних загроз [6]. Ентропія трафіку в часовому вікні обчислюється за формулою інформаційної ентропії з урахуванням стану розподілу пакетів, представленого перетворенням у часі під час передачі до контролера [7].

Якщо зловмисник розпочинає DDoS-атаку на контролер SDN, раптово відбувається різке збільшення трафіку в заданому часовому вікні незалежно від стратегії формування пакета який атакується, що призводить до зниження інформаційної ентропії. Завдяки цьому унікальному механізму, даний метод ефективно інтегрує функції SDN, точно виявляє DDoS-атаку на контролер, успішно нівелює негативний вплив стратегії зловмисника на показник виявлення, значно підвищує точність і надійність детектування, а також забезпечує високий рівень безпеки контролера SDN.

Метод статистики інформаційної ентропії на основі розподілу Пуассона відіграє важливу роль у методі виявлення DDoS-атак на контролери SDN. Розподіл Пуассона – це статистичний інструмент, який допомагає прогнозувати частоту випадкових подій, таких як надходження пакетів, у межах певного часу та простору. Ця модель може бути особливо корисною у сценаріях, коли контролеру SDN необхідно виявити розподілену атаку на відмову в обслуговуванні шляхом аналізу вхідних пакетів даних [8]. Моделюючи процес надходження пакетів як пуассонівський процес, можна більш точно проаналізувати патерни розподілу трафіку. Це забезпечує наукове та об'єктивне підґрунтя для статистики інформаційної ентропії. Обчислюючи інформаційну ентропію на основі розподілу Пуассона, можна точніше фіксувати

зміни аномальної швидкості потоку, покращити здатність виявлення DDoS-атак, ефективно відрізнити нормальні коливання швидкості потоку від аномалій, спричинених атакуючим трафіком, зробити результати перевірки більш точними та надійними, заощадити дорогоцінний час для своєчасного вжиття захисних заходів, а також гарантувати надійну безпеку та стабільність рівня управління мережею SDN.

Концепція інформаційної ентропії здебільшого використовується для опису невизначеності випадкових величин [3]:

$$H = -\sum_{i=1}^n p_i \log p_i, \quad (1)$$

де H – інформаційна ентропія, p_i – ймовірність появи i -ї події, n – кількість можливих результатів (значень) випадкової величини.

У мережевому середовищі SDN за умов нормального трафіку швидкість мережевого потоку є більш випадковою, тому інформаційна ентропія стає більшою. Коли ж швидкість потоку під час DDoS-атаки стає аномально високою, розподіл швидкості мережевого потоку одразу стає передбачуваним, трафік сильно концентрується, і інформаційна ентропія значно зменшується. Базуючись на цій властивості, багато дослідників застосовують інформаційну ентропію для виявлення мережевих аномалій.

Наразі існують два основні статистичні методи для виявлення DDoS-атак на контролер SDN. Перший метод аналізує ентропію інформації про цільову IP-адресу в пакеті, надісланому від комутатора SDN до контролера, тоді як другий метод зосереджується на ентропії інформації про IP-адресу джерела в пакеті даних, переданому від комутатора SDN до контролера. Ці методи ґрунтуються на розумінні розподілу подробиць IP-адрес джерела під час DDoS-атак та концентрованої природи інформації про цільові IP-адреси. Використовуючи дані про передачу пакетів у режимі реального часу, можна обчислити ймовірність збігу як для IP-адреси джерела, так і для цільової, що дозволяє визначити значення ентропії інформації про IP-адресу джерела або цілі шляхом застосування формули інформаційної ентропії. Цей підхід дозволяє ідентифікувати потенційні DDoS-атаки шляхом аналізу патернів розсіювання (дисперсії) IP-інформації.

У сфері DDoS-атак, спрямованих на контролери SDN, зловмисники використовують такі складні методи, як подробиць IP-адреси джерела (спуфінг) та імітація бажаних IP-адрес [5]. Ці так-

тики маніпулюють правилами таблиць потоків на комутаторах, зрештою спрямовуючи пакети до контролера, що призводить до збою системи. Це створює серйозну проблему для традиційних методів статистичної ентропії щодо розрізнення різноманітних стратегій атак. Як наслідок, існуючим механізмам захисту може бути важко ефективно боротися з цими еволюціонуючими загрозами. Для експертів з безпеки вкрай важливо розробити більш надійні та адаптивні стратегії для захисту інфраструктур SDN від подібних зловмисних дій.

Запропонований статистичний метод використовує інформаційний розподіл Пуассона для аналізу розподілу потоку інформаційної ентропії, пропонуючи свіжий погляд на аналіз даних. Мета цього методу полягає в отриманні інформації про розподіл швидкості потоку для обчислення ентропії пакетів на основі даних, наданих комутатором. Навіть якщо зловмисник ініціює DDoS-атаку на контролер, використовуючи будь-яку стратегію атаки, раптовий трафік DDoS-атаки неминуче змінить розподіл трафіку пакетів, що передаються до контролера.

Припускаючи, що ймовірність того, що контролер отримує пакет за одиницю часу від комутатора, є величиною λ , вираз (2) можна використати для доведення того, що процес надсилання пакета переривання до контролера підпорядковується розподілу Пуассона.

Повідомлення із запитом на комутацію до контролера для переходу до періоду T розглядається в дослідженні як незалежна випадкова величина. Цей елемент відіграє вирішальну роль у безперервному процесі оптимізації та управління. Це означає, що немає жодного зв'язку між повідомленнями із запитами, отриманими протягом різних періодів, і кожне повідомлення із запитом є випадковим та не впливає на інші періоди.

Розділивши період часу t на n менших періодів, k пакетів, отриманих протягом періоду t , можна вважати рівномірно розподіленими між цими n періодами. Ймовірність того, що період t міститиме k пакетів протягом n періодів. Цей метод дозволяє точно визначити розподіл ймовірностей надходження пакетів у межах заданого часового проміжку.

$$p_k(t) = C_k^n (\lambda \Delta t)^k (1 - \lambda \Delta t)^{n-k} \quad (2)$$

Розподіл Пуассона використовується для моделювання надходження пакетів від комутатора до контролера за умови виконання специфічних умов [7]. Коли ці умови виконуються, вхідні

запити в момент часу t підпорядковуються розподілу Пуассона, що дозволяє описати профіль трафіку з точки зору кількості запитів, отриманих контролером від комутатора. Профіль Пуассона ефективно відображає потік вхідного пакетного трафіку в цій комунікаційній системі.

Для ефективного аналізу пакетного трафіку ретельно підбираються кількість та тривалість статистичних часових вікон для відстеження пакетів, що надсилаються від комутатора до контролера, що дозволяє отримувати точні статистичні дані щодо вхідного пакетного трафіку. Завдяки оптимізації цих параметрів можна ретельно відстежувати продуктивність мережі та управляти нею. Результати статистики в режимі реального часу обробляються за допомогою формули розподілу Пуассона. На основі результатів обробки будується розподіл швидкості потоку для кожного часового вікна, а значення ентропії цього розподілу обчислюється за допомогою формули інформаційної ентропії.

Для боротьби з DDoS-атаками на контролери SDN запроваджено новий метод до виявлення з використанням розширеної інформаційної ентропії. Як рішення було розроблено модель виявлення, зображену на рисунку 1. Метод має на меті ефективно реагування на загрози безпеці та підтримання стабільності мережі. Модель ретельно розроблена з урахуванням характеристик мережі SDN та моделі поведінки під час DDoS-атаки. Принцип інформаційної ентропії ефективно використовується для аналізу розподілу швидкостей потоку всередині контролера під час процесу перетворення.

За умов нормального потоку швидкість мережевого трафіку розподіляється відносно випадково, тоді як DDoS-атака спричиняє швидку та раптову концентрацію розподілу трафіку, внаслідок чого інформаційна ентропія стрімко падає. Спираючись на цю суттєву відмінність, модель виявлення здатна точно фіксувати аномальні зміни потоку, а контролер SDN може ефективно виявляти DDoS-атаки. Порівняно з традиційними методами виявлення, ця модель не обмежується статистикою даних IP-адрес джерела та призначення пакетів, а ефективно враховує розподіл усього трафіку. Вона успішно усуває недоліки традиційних методів під час протидії різним стратегіям атак, значно підвищує точність і надійність виявлення DDoS-атак у контролері SDN, а також забезпечує потужну технічну підтримку для гарантування безпеки та стабільності цілей управління мережею SDN.

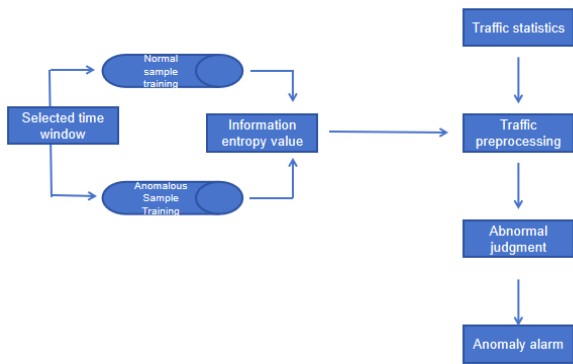


Рис. 1. Схема моделі виявлення DDoS-атак на контролер SDN

Для моделі виявлення, зображеної на рисунку 1, першим кроком є науково обґрунтоване та раціональне визначення відповідних параметрів часового вікна, зокрема його розміру та тривалості. Точний вибір цих двох параметрів відіграє важливу роль у загальній ефективності виявлення.

Створюються два набори вибірок трафіку – один із нормальною швидкістю потоку, а інший з аномальною, із заздалегідь визначеними критеріями розміру та тривалості. Після навчання на цих вибірках необхідний інструмент статистичного аналізу для визначення порогу верифікації інформації для методу виявлення. Поріг обчислюється на основі результатів процесу навчання, що дозволяє точно ідентифікувати аномальні патерни трафіку. Дане порогове значення використовується як правило прийняття рішень, за яким швидкість потоку в реальному часі класифікується як нормальна або аномальна.

В очікуванні встановлення порогового значення контролер ретельно проводить статистичний аналіз у режимі реального часу, точно відстежуючи кількість груп (пакетів) у межах кожного часового вікна. З використанням моделі розподілу Пуассона обчислюються ймовірності появи різної кількості груп у межах кожного часового вікна, після чого визначається значення ентропії, пов'язане з даними трафіку в цей проміжок часу. Такий ретельний обчислювальний підхід дає цінне розуміння патернів трафіку, представляючи їх у вигляді інформаційної ентропії. Завдяки цьому контролер отримує критично важливі дані для прийняття обґрунтованих рішень щодо стратегій управління трафіком. Отримавши значення ентропії для часового вікна, воно точно порівнюється із заздалегідь визначеним пороговим значенням. Порівняльний аналіз дозволяє чітко встановити, чи є поточний трафік аномальним чи нормальним, і ефективно виявити, чи зазнає контролер SDN DDoS-атаки.

Для точного аналізу регулярних патернів трафіку надзвичайно важливо ретельно вибрати розмір вікна n та тривалість t для кожного часового вікна. Шляхом статистичного аналізу нормального трафіку в цих обраних часових вікнах можна сформувати репрезентативну вибірку. Метод дозволяє отримати всебічне розуміння типової поведінки трафіку.

Підготовка трафіку передбачає управління швидкостями потоків в реальному часі за допомогою статистики ентропії та розподілу Пуассона. Метод допомагає підтримувати стабільний потік трафіку шляхом аналізу даних і відповідного коригування для забезпечення ефективної роботи систем передачі даних. Ймовірність потоку в кожному часовому вікні обчислюється на основі рівняння розподілу Пуассона. Значення інформаційної ентропії для N часових вікон обчислюється на основі формули інформаційної ентропії. Використовуючи кілька стандартних вибірок потоку, результати навчання обчислюються та вимірюються, а метод статистичного аналізу застосовується для обчислення середньої ентропії, дисперсії, довірчого інтервалу, максимального довірчого інтервалу та мінімального довірчого інтервалу результатів для кількох стандартних вибірок трафіку.

Навчальний модуль для моделі аномального потоку передбачає попередню обробку швидкостей аномальних потоків у реальному часі з використанням фіксованого розміру часового вікна n та тривалості вікна t . Препроцесор потоку спеціально націлений на аномальні швидкості потоку, що обчислюються в режимі реального часу за допомогою методу статистики інформаційної ентропії на основі розподілу Пуассона. За допомогою рівняння розподілу Пуассона визначається ймовірність потрапляння аномальних потоків у кожне часове вікно, що веде до обчислення значення інформаційної ентропії в межах часового вікна. Процес дозволяє виявляти та аналізувати аномальні швидкості потоку для підвищення точності та ефективності систем виявлення аномалій. По суті, цей модуль відіграє вирішальну роль у посиленні безпеки мережі шляхом ідентифікації потенційних загроз у режимі реального часу. Було опрацьовано кілька вибірок аномального трафіку та отримано низку результатів навчання. Середня ентропія, дисперсія, довірчий інтервал, максимальний довірчий інтервал та мінімальний довірчий інтервал були отримані шляхом статистичного аналізу (рисунки 2).

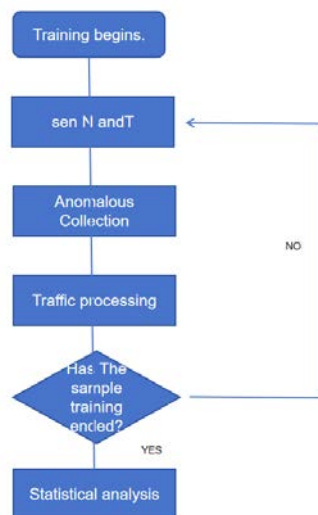


Рис. 2. Блок-схема процесу навчання на вибірках аномального трафіку

Статистичний аналіз результатів вибірки нормального трафіку дозволяє отримати середню ентропію трафіку, дисперсію, довірчий інтервал, максимальний довірчий інтервал та мінімальний довірчий інтервал. Статистичний аналіз результатів вибірки аномального трафіку показує середню ентропію аномального трафіку, дисперсію, довірчий інтервал, максимальний довірчий інтервал та мінімальний довірчий інтервал.

Аналіз швидкостей потоку, як нормальних, так і аномальних, може виявити важливі відмінності в даних. Порівнюючи мінімальний довірчий інтервал нормального потоку з максимальним довірчим інтервалом аномального потоку, можна встановити порогове значення. Відмінність слугує орієнтиром для розмежування нормальної та аномальної швидкості потоку. Хоча будь-яке значення в межах цього інтервалу потенційно може бути використане як поріг, зазвичай доцільно вибирати значення вище максимального довірчого інтервалу аномального потоку як порогове. Такий підхід забезпечує більш точне розмежування нормальних та аномальних швидкостей потоку, що дозволяє краще відстежувати дані потоку та управляти ними.

Експерименти проводилися на віртуальній машині з Ubuntu 22.04. Емулятор мережі Mininet та програмний комутатор Open vSwitch необхідно налаштувати на одній віртуальній машині з Ubuntu 22.04, тоді як контролер Ryu слід встановити на окремій віртуальній машині, що також працює під управлінням Ubuntu 22.04. Така конфігурація забезпечує оптимальну продуктивність і сумісність між пристроями в мережі.

Емулятор мережі Mininet є ідеальною платформою для моделювання топології мережі та генерації трафіку. Для цього використовується власний код програми. За допомогою Mininet було налаштовано власну топологію, тип комутації, версію протоколу OpenFlow, а також параметри підключення до IP-адреси та порту комп'ютера керування. Одночасно було розгорнуто інфраструктуру та управління SDN, а також завершено розробку власного додатка для цього специфічного середовища. Експериментальна топологія базується на скрипті, що імітує мережу в середовищі Mininet.

Експерименти проводилися з використанням часових вікон тривалістю 5 секунд, 10 секунд та 15 секунд. Середній інтервал становить 5, 10 і 15 секунд, а надходження пакетів підпорядковується розподілу Пуассона. Генерація аномального трафіку має свої часові межі та виконує свою функцію під час тестування.

Після незначної модифікації коду було налаштовано контроль над джерелами відправлення пакетів у мережі. У процесі цієї вторинної розробки було реалізовано наступні корисні функції:

- загалом, уся статистична інформація передається та збирається в режимі реального часу;
- збір статистики часу надходження пакетів. Раптовий наплив пакетів (пікові навантаження) додає хаосу, ускладнюючи аналіз патернів передачі даних та поведінки мережевого трафіку;
- за допомогою рівняння розподілу Пуассона визначається ймовірність надходження точної кількості пакетів у межах заданого часового проміжку на основі загального обсягу трафіку;
- формула інформаційної ентропії обчислює ентропію трафіку в конкретному часовому вікні, вказуючи на ймовірність перевантаження або аномалії. Числове представлення допомагає зрозуміти патерни трафіку та оптимізувати інфраструктуру для забезпечення ефективного потоку даних.

Етап тестування має включати три серії експериментів. Перша стратегія атаки передбачає підробку (спуфінг) IP-адреси джерела для атаки на справжню цільову IP-адресу машини в межах мережі клієнта. Другий підхід полягає у підробці IP-адреси джерела та фальсифікації цільової IP-адреси на основі топології мережі клієнта. Успішна реалізація цих стратегій може призвести до згубних наслідків для цільової системи. Третя стратегія атаки є комбінацією перших двох. Для цих трьох різних стратегій обчислюється нормальна швидкість потоку та рівень помилок виявлення.

Часове вікно поділяється на інтервали по 5, 10 та 15 секунд. Потім комутатор надсилає пакети даних до контролера на основі цих інтервалів, що забезпечує ефективну передачу даних та управління ними (рисунок 3).

Як показано на рисунку 3, при тривалості часового вікна 5 секунд та 10 секунд розподіл швидкості вхідних пакетів на контролері є відносно стабільним і близьким до трьох умов, необхідних для аналізу за теорією розподілу Пуассона. У межах 10-секундного інтервалу в деяких суміжних часових вікнах зміна інформаційної ентропії є відносно невеликою. Відповідно, часове вікно, визначене для імітаційного тестування цього методу виявлення, становить 10 секунд.

Під час вимірювання розподілу мережевого трафіку розмір часового вікна є вирішальним фактором для врахування інформаційної ентропії та невизначеності в запропонованій схемі. Зазвичай часове вікно ретельно підбирається для оптимізації результатів. У проведеному експерименті було попередньо вибрано п'ять різних розмірів часових вікон на основі стабільності розподілу потоку пакетів у кількох послідовних вікнах. Згодом було обчислено значення інформаційної ентропії, щоб оцінити ефективність обраних часових вікон для точного вимірювання розподілу мережевого трафіку.

Шляхом налаштування розміру та тривалості часового вікна трафік можна класифікувати як нормальний або аномальний. Статистичний аналіз навчальних тестових даних дозволяє визначити порогове значення ентропії швидкості потоку. Цей метод допомагає розрізняти звичайні патерни трафіку та потенційні аномалії, підвищуючи безпеку та ефективність мережі.

Десять навчальних серій із нормальним трафіком вимірювалися протягом п'яти періодів, кожен з яких тривав 10 секунд, рисунки 4, 5.

Відповідно було розраховано результати статистичного аналізу ентропії для 10 наборів нормальної та аномальної швидкості потоку.

Визначено стандартне відхилення, довірчий інтервал (95% довірчий інтервал), а також верхню та нижню межі довірчого інтервалу. На основі порівняння нижньої межі довірчого інтервалу (мінімуму) для нормальної швидкості потоку та верхньої межі довірчого інтервалу (максимуму) для аномальної швидкості потоку можна встановити відповідне порогове значення на рівні 0.53. Значення слугує надійним індикатором для розмежування цих двох типів трафіку.

У дослідженні розглядалися коефіцієнт виявлення та рівень помилок для аналізу аномальних швидкостей потоку за трьох різних стратегій атак. Під час експериментів на платформі моделювання оцінювалися показники виявлення та помилкові спрацьовування для кожної стратегії. У рамках цього дослідження було визначено розрахунок коефіцієнта виявлення DR, що покращує розуміння аномальних потоків у різних сценаріях атак і демонструє ефективність стратегій виявлення.

Для кількісної оцінки ефективності виявлення трафіку атак використовуються показники TP та FN. Показник TP відображає кількість правильно ідентифікованих вибірок трафіку атаки, тоді як FN позначає вибірки атак, які були пропущені системою під час оцінювання.

Показник FP позначає кількість вибірок нормального потоку, які були хибно розпізнані як

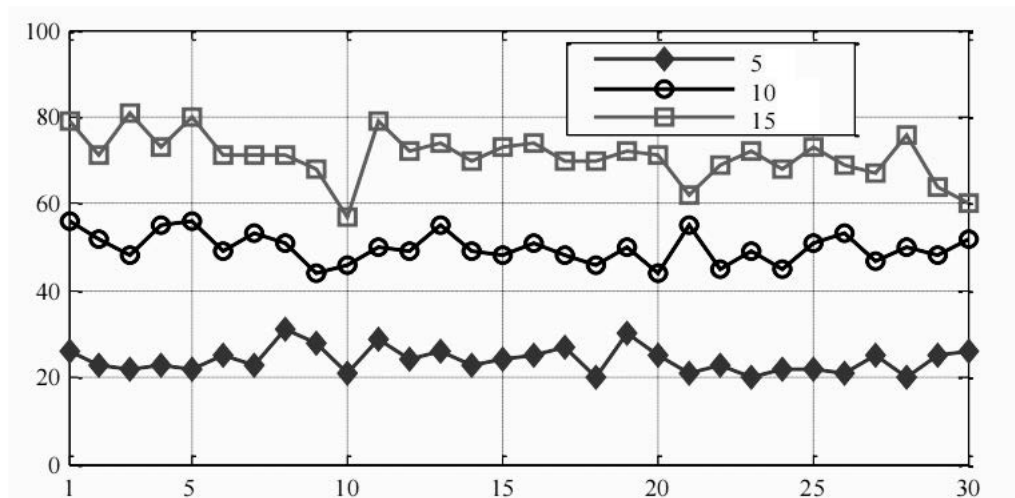


Рис. 3. Часове вікно

Time	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
Number of	50	52	53	48	50	44	47	48	58	45
Entropy	0.78979					0.75881				
Time	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20
Number of	51	44	45	42	47	58	56	56	53	53
Entropy	0.78064					0.76706				
Time	T21	T22	T23	T24	T25	T26	T27	T28	T29	T30
Number of	54	52	52	52	58	58	57	54	52	52
Entropy	0.76627					0.75727				
Time	T31	T32	T33	T34	T35	T36	T37	T38	T39	T40
Number of	54	52	58	57	56	47	47	57	44	50
Entropy	0.76156					0.72570				
Time	T41	T42	T43	T44	T45	T46	T47	T48	T49	T50
Number of	57	58	58	58	54	50	50	50	51	49
Entropy	0.76628					0.80804				

Рис. 4. Звіт щодо нормального потоку

Time	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
Number of	42	52	34	48	50	22	47	31	31	45
Entropy	0.78979					0.75881				
Time	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20
Number of	23	44	34	42	47	34	31	31	53	34
Entropy	0.48064					0.21706				
Time	T21	T22	T23	T24	T25	T26	T27	T28	T29	T30
Number of	23	52	43	52	58	58	23	2	52	21
Entropy	0.56627					0.75727				
Time	T31	T32	T33	T34	T35	T36	T37	T38	T39	T40
Number of	21	21	58	57	56	47	32	57	44	50
Entropy	0.73120					0.64210				
Time	T41	T42	T43	T44	T45	T46	T47	T48	T49	T50
Number of	57	58	58	23	54	50	23	50	51	49
Entropy	0.26234					0.23430				

Рис. 5. Дані аномального потоку

атака, а TN позначає кількість правильно ідентифікованих вибірок нормального потоку.

Експериментальні результати демонструють, що метод виявлення DDoS-атак на контролер SDN із використанням інформаційної ентропії вищого порядку забезпечує кращі показники виявлення та знижує рівень помилок для різних стратегій атак. Інноваційний підхід пропонує надійне рішення для ефективної та дієвої боротьби з кіберзагрозами в системах мережевої безпеки.

Метод виявлення ефективно долає обмеження підходів, що базуються виключно на інформаційній ентропії IP-адрес призначення або IP-адрес джерела, і може широко застосовуватися проти різноманітних стратегій зловмисників. Крім того, цей метод дозволяє додатково інтегрувати ознаки DDoS-атак у контролер SDN та ефективно виявляти атаки, спрямовані безпосередньо на нього.

Експериментальні результати показують, що метод виявлення DDoS-атак на контролер

SDN, який використовує інформаційну ентропію вищого порядку, забезпечує вищий рівень виявлення та зменшує кількість помилок обчислень для різних стратегій атак. Цей підхід пропонує надійне рішення для ефективної та дієвої боротьби з кіберзагрозами в застосунках мережевої безпеки. Метод захисту допомагає фільтрувати різноманітний трафік атак, одночасно запобігаючи DDoS-атакам на контролер.

Порогове значення є більш гнучким і доцільним, ніж середній розподіл.

Метод експоненційного згладжування використовує кількість отриманих повідомлень *Packet-In* у різні часові інтервали для точного прогнозування стану та навантаження контролера. Аналізуючи параболічний тренд, виявлений у повідомленнях *Packet-In*, як надійний метод можна обрати потрібне експоненційне згладжування. Метод забезпечує прогнозування обсягу інформації *Packet-In*, очікуваної в різні часові вікна. Використовуючи ці стратегії, контролери можуть передбачати та ефективно управляти надходженням даних *Packet-In* для досягнення оптимальної продуктивності. Порогове значення передається на кожен граничний комутатор через канал зв'язку між контролером і комутатором. Граничний комутатор управляє повідомленнями із запитом, що надсилаються до контролера, на основі динамічного управління пороговими значеннями.

Конкретні кроки методу динамічного вибору порогового значення на основі експоненційного згладжування є такими:

- налаштування параметрів. Налаштування контролера після моделювання експоненційного згладжування для комутатора та вибір відповідного оптимального параметра згладжування;

- прогнозування базових значень для різних граничних комутаторів. Контролер виконує експоненційне згладжування на основі формули потрібного експоненційного згладжування, яка підраховує кількість повідомлень, надісланих від різних граничних комутаторів із запитом на правила таблиці потоків для кожного часового вікна, та прогнозує згладжене значення для наступного часового вікна;

- встановлення порогових значень. Контролер встановлює порогове значення для повідомлень із запитом кожного граничного комутатора на основі відсотка повідомлень, відправлених цим комутатором у попередньому часовому вікні, згладженого прогнозованого значення для наступного часового вікна та загальної кількості запитів до контролера;

- динамічне коригування. Контролер коригує порогові запити для різних граничних комутаторів у режимі реального часу за допомогою протоколів зв'язку, забезпечуючи ефективний розподіл ресурсів на рівні інфраструктури без високих накладних витрат.

Експериментальне моделювання SDN переважно включає симуляцію мережевої платформи SDN, симуляцію контролера та моделювання мережевого трафіку.

Для генерації нормального експериментального трафіку використовується команда *iperf*, що запускається за допомогою *shell*-скрипта, тоді як аномальний трафік створюється за допомогою інструмента *hping3*. Методи слугують для перевірки продуктивності мережі та виявлення потенційних вразливостей. DDoS-атака на контролер SDN моделювалася за допомогою методу SYN Flood.

Тестове середовище побудоване з використанням двох віртуальних машин наведено на рисунок 6.

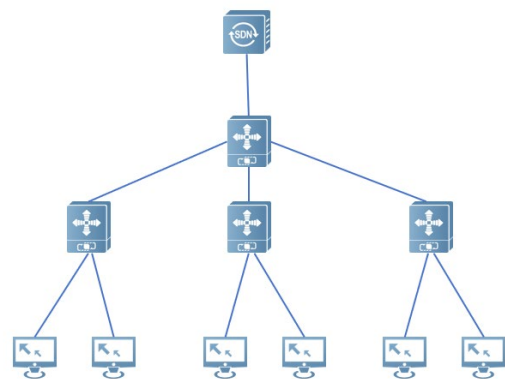


Рис. 6. Карта спеціальної топології для експерименту із захисту мережі

Було виконано моделювання на основі експоненційного згладжування, за результатами якого кінцеві параметри згладжування були визначені як 0.14 та 0.27 відповідно.

Під час експерименту після імітації DDoS-атак було проведено вимірювання кількості повідомлень *Packet-In*, отриманих контролером від комутатора, кількості правил таблиці потоків, переданих на комутатор, а також рівня втрати пакетів для звичайного UDP-трафіку в кожному часовому вікні для кількох груп без використання політик захисту.

У межах цього дослідження було оцінено різні стратегії захисту разом із кількістю правил таблиці потоків, надісланих контролером на комутатор. Крім того, під час експерименту було змодельовано рівень втрати пакетів нормального

UDP-трафіку після DDoS-атаки на контролер. Метою було визначити ефективність різних стратегій у пом'якшенні наслідків таких атак.

Результати продемонстрували різні рівні успішності в захисті мережевої інфраструктури та мінімізації збоїв, спричинених зловмисною діяльністю. Було проведено порівняльний аналіз експериментальних результатів на основі двох різних стратегій.

У цьому експерименті DDoS-атаки на контролер розглядалися у двох різних ситуаціях: за наявності заходів захисту та за їхньої відсутності.

Контролер під час симуляції оцінює дані вхідних пакетів від комутаторів, що дозволяє йому ефективно керувати мережевим трафіком. Тести підтверджують ефективність цього процесу за різних умов, що гарантує надійну роботу системи.

Застосовуючи стратегію захисту, граничні комутатори можуть оцінювати надійність пакетів за допомогою встановленого порогу, відправляючи до контролера лише надійні повідомлення, незважаючи на наявність трафіку атаки. Цей підхід підвищує безпеку та ефективність мережі, оскільки комутатори надають пріоритет надійній передачі даних. Такий механізм оцінки в реальному часі забезпечує цілісність системи та мінімізує збої, спричинені потенційними загрозами. Нормальна IP-адреса джерела знаходиться в таблиці історії надійних IP-адрес і її трафік передається контролеру, тоді як IP-адреса джерела потоку атаки в ній відсутня. Система відстежує та зберігає IP-адреси, залучені до атак, знижуючи рівень довіри до пакетів, надісланих із цих адрес. Позначаючи підозрілі IP-адреси та фільтруючи їхній трафік, система ефективно нейтралізує потенційні загрози. Проактивний захід допомагає захиститися від зловмисних атак і гарантує безпеку мережі. Експериментальні дані щодо захисту від атак показують, що коли контролер зазнає DDoS-атаки, розроблена стратегія ефективно фільтрує велику кількість хибних повідомлень і запобігає перевантаженню контролера величезним обсягом шкідливого трафіку.

Без політики захисту DDoS-атака може легко перевантажити контролер в 11-му часовому вікні, що призведе до різкого збільшення втрати пакетів для нормального мережевого трафіку. Вкрай важливо мати механізми захисту для запобігання таким збоєм. Під час 14-го часового вікна рівень втрати пакетів нормального трафіку в мережі досягає 100%. Після вжиття заходів захисту рівень втрати пакетів у часових вікнах 11, 12 та 13 залишається низьким (у межах норми), нормальна передача UDP-трафіку підтримується в наступних часових вікнах, а рівень втрати пакетів падає до 0.

Коли контролер зазнає DDoS-атаки, більша частина трафіку атаки інкапсулюється в пакети, надіслані до контролера, які вимагають створення

нових правил таблиці потоків. Ці запити не лише споживають величезні обсяги ресурсів пропускної здатності контролера, але й змушують його помилково надсилати шкідливі правила на комутатор. Таким чином, під час обробки нормального UDP-трафіку контролеру вже не вистачає ресурсів для встановлення правил передачі, і він відкидає багато легітимних UDP-пакетів. Політика захисту дозволяє контролеру забезпечити безперебійну обробку UDP-трафіку шляхом передачі правил маршрутизації на комутатор на основі вхідних повідомлень із запитом, гарантуючи стабільну роботу мережі. Саме тому рівень втрати пакетів значно знизився після вжиття заходів захисту.

Ефективність захисту контролера SDN від DDoS-атак можна оцінити за трьома ключовими показниками:

- кількість вхідних пакетів, отриманих контролером від комутатора;
- кількість правил таблиці потоків, надісланих на комутатор;
- рівень втрати пакетів для нормального UDP-потoku.

Використовуючи динамічні пороги та рівні довіри до IP-адрес джерела, контролер може успішно відфільтровувати потоки DDoS-атак, згенеровані такими інструментами, як hping3. Цей проактивний підхід захищає контролер від перевантаження під час атак, дозволяючи йому продовжувати надавати нормальні послуги. Постійно відстежуючи та коригуючи ці порогові значення, контролер може ефективно звести нанівець вплив DDoS-атак на свою роботу. Отже, запропонований у цьому розділі метод надійно та ефективно захищає контролер SDN.

Висновки. Проведене дослідження дозволило розробити та всебічно обґрунтувати адаптивний метод захисту контролера програмно-конфігурованих мереж від розподілених атак на відмову в обслуговуванні. Наукова новизна підходу полягає у синергії використання інформаційної ентропії вищого порядку та статистичної моделі розподілу Пуассона, що забезпечує високу точність детектування аномалій навіть за умов складних стратегій атак із використанням підробки IP-адрес.

Експериментальна перевірка на базі емулятора Mininet та контролера Ryu підтвердила, що часове вікно тривалістю 10 секунд та порогове значення ентропії 0,53 є оптимальними параметрами для стабільної ідентифікації шкідливого трафіку. Впровадження механізму динамічного керування порогом на основі експоненційного згладжування разом із системою оцінки кредитів довіри до джерел дозволило перенести частину обчислювального навантаження на граничні комутатори. Це стратегічне рішення забезпечило ефективну фільтрацію повідомлень Packet-In, що критично важливо для запобігання переван-

таженню центрального процесора контролера та каналів зв'язку.

Аналіз результатів моделювання продемонстрував ефективність запропонованої методики у сценаріях із активованим захистом рівень втрати пакетів легітимного трафіку знизився до нуля, тоді як у незахищеній мережі атака призводила до

повної відмови в обслуговуванні. Таким чином, розроблений метод не лише підвищує рівень кібербезпеки SDN-інфраструктури, але й гарантує безперервність надання мережеслужб у реальному часі, що робить його перспективним для впровадження у сучасних корпоративних та хмарних мережах.

Список літератури:

1. Choi W., Pandey S., Kim J. Detecting Cybersecurity Threats for Industrial Control Systems Using Machine Learning. *IEEE Access*. 2024. № 12. Pp. 153550-153563. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3478830>
2. Яровий К.О., Гончар Л.В., Бабаян Д.П. Інформаційні системи і технології як невід'ємна частина в управлінні підприємством. *Інноваційна економіка*. 2021. № 7-8. С. 119-23. <https://doi.org/10.37332/2309-1533.2021.7-8.16>
3. Барковська О.Ю., Ні Я.С., Янковський О.А., Романенко А.О., Перетяка Є.О. Модель системи автоматизованого навантажувального тестування програмних застосунків із використанням методів штучного інтелекту. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2025. № 1(30). С. 47-58. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v30i1.326699>
4. Fedorchenko V., Yeroshenko O., Shmatko O., Kolomiitsev O., Omarov M. Password hashing methods and algorithms on the .Net platform. *Advanced Information Systems*. 2024. № 8(4). Pp. 82-92. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.4.11>
5. Barkovska O., Ruban I., Tymoshenko D., Holovchenko O., Yankovskyi O. Research on mobile machine learning platforms for human gesture recognition in human-machine interaction systems. *Technology Audit and Production Reserves*. 2025. №2(2(82)). Pp. 6-14. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.325423>
6. Idris M., Syarif I., Winarno I. Web Application Security Education Platform Based on OWASP API Security Project. *EMITTER International Journal of Engineering Technology*. 2022. №10(2). Pp. 246-261. <https://doi.org/10.24003/emitter.v10i2.705>
7. Barkovska O. Двофакторна автентифікація на основі методу KWS та голосової верифікації. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2025. № 3(33). С. 5-18. <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.3.005>
8. Федорченко В.М., Єрошенко О.А. Застосування алгоритмів штучного інтелекту для моделювання загроз інформаційних систем. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Т.6 (75). Ч. 2. С. 384-391. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.2/52>

Yeroshenko O.A., Fedorchenko V.M., Partyka S.O., Pyvovarova D.I. HIGHER-ORDER INFORMATION ENTROPY-BASED DDOS ATTACK DETECTION METHOD FOR SDN CONTROLLER

The article is devoted to solving the urgent problem of ensuring the security of Software-Defined Networks (SDN), specifically protecting the network control plane from Distributed Denial of Service (DDoS) attacks. The unique architecture of SDN, which separates the control plane from the data plane, makes the centralized controller a critical point of failure and a primary target for cyber-attacks. Overloading the Packet-In resource leads to total degradation of the entire network infrastructure.

The paper analyzes the shortcomings of existing statistical analysis methods, which typically focus only on the set of IP addresses without considering dynamic temporal factors, making them vulnerable to sophisticated attack strategies such as intelligent spoofing. The authors propose an enhanced DDoS attack detection method based on the use of higher-order information entropy and a Poisson distribution statistical model. The core of the method lies in the precision analysis of packet flow rates within fixed time windows. Modeling the request arrival process as a Poisson process allows for more accurate identification of anomalous traffic fluctuations: under normal conditions, entropy remains consistently high due to the statistical randomness of flows, whereas during an attack, it drops sharply as a result of artificial traffic concentration on specific nodes.

Experimental validation of the method was conducted using a distributed topology in the Mininet emulator, Open vSwitch, and the Ryu controller. Simulation results confirmed that the proposed approach provides higher detection accuracy and a significantly lower computational error rate for various attack strategies compared to traditional solutions. It was established that a 10-second time window is optimal for stable anomaly detection. Additionally, an implemented "trust credit" system for source IP addresses effectively filters malicious traffic at the edge switch level, preserving scarce controller resources for legitimate requests. This ensures high availability and resilience of the network infrastructure even under intensive cyber-influence.

Keywords: Software-Defined Networks, SDN controller, DDoS attacks, information entropy, poisson distribution, cybersecurity, time window, exponential smoothing.

Дата першого надходження статті до видання: 27.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Здольник М.О.

<https://orcid.org/0009-0000-3232-1712>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Степанець О.В.

<https://orcid.org/0000-0003-4444-0705>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЦІЛЬОВІ ФУНКЦІЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ЛОКАЛЬНИМИ ОБ'ЄКТАМИ ТЕПЛОСПОЖИВАННЯ В МУЛЬТИАГЕНТНИХ СИСТЕМАХ

У статті розв'язується актуальна науково-практична задача інтелектуалізації індивідуальних теплових пунктів (ІТП) у контексті переходу до сучасних систем централізованого теплопостачання 4-го та 5-го поколінь та реалізації концепції інтегрованих розумних енергетичних систем Smart Energy Systems. Традиційні системи автоматизації, побудовані на базі жорстких погодних графіків та локальних ПД-регуляторів, не здатні ефективно вирішувати багатокритеріальні конфлікти, пов'язані з багатозонними тарифами та динамічними обмеженнями локальних енергомереж. Метою дослідження є розробка та математичне обґрунтування універсальної цільової функції для стратегічного мультіагентного рівня керування ІТП.

Запропоновано дворівневу кіберфізичну архітектуру системи керування, яка чітко розмежовує інтелектуальний макрорівень прийняття стратегічних рішень мультіагентною системою та виконавчий рівень класичного регулювання. Основна увага приділена формалізації цільової функції мультіагентної системи керування об'єктами теплоспоживання.

Шляхом псевдодинамічного моделювання на добовому горизонті з використанням алгоритму оптимізації L-BFGS-B доведено працездатність та універсальність запропонованого математичного апарату. Доведено, що зміна ролі об'єкта досягається виключно через реконфігурацію вектора вагових коефіцієнтів і форми функцій штрафу. Аналіз результатів симуляції екстремальних збурень підтвердив здатність системи до розв'язання ресурсних конфліктів. Формулювання цільової функції дає змогу системі керування реалізовувати стратегію контрольованої деградації: об'єкти житлового фонду діють як гнучке навантаження, беручи участь у програмах управління попитом та знижуючи споживання ціною допустимого дискомфорту, тоді як промислові об'єкти захищають власні технологічні процеси, свідомо приймаючи фінансові штрафи. Впровадження запропонованих рішень перетворює ІТП з пасивних споживачів на активні гнучкі вузли, здатні балансувати локальні енергомережі без загрози апаратній чи технологічній безпеці.

Ключові слова: автоматизація технологічних процесів, мультіагентні системи керування, теплопункт, децентралізоване керування, цифрова трансформація.

Постановка проблеми. Сучасна енергетика перебуває на етапі фундаментальної трансформації, що характеризується переходом від жорстко централізованих ієрархічних структур до гнучких, децентралізованих мереж, відомих як Smart Energy Systems [1]. У секторі теплопостачання цей процес відображається в еволюції систем централізованого теплопостачання до рівня 4-го (4GDH) та 5-го поколінь (5GDH) [2]. Ключовою

особливістю цих систем є інтеграція різномірних джерел енергії, зниження температурних графіків для зменшення втрат та активна роль споживача, який перетворюється на активного учасника енергетичного обміну. Однак наявні методи автоматизації, що базуються на класичній піраміді АСУТП та ПД-регулюванні, досягли межі своїх можливостей у керуванні такою складністю. Вони не здатні ефективно розв'язувати задачі багатокри-

теріальної оптимізації в реальному часі в умовах стохастичного попиту та змінної генерації.

Запропонований у даному дослідженні перехід до мультиагентних систем (Multi-Agent Systems, MAS) є відповіддю на ці виклики [3]. Архітектура MAS дозволяє декомпонувати складну глобальну задачу керування тепlopостачанням на множину локальних задач, що розв'язуються автономними агентами – інтелектуальними індивідуальними тепловими пунктами (ІТП) та навіть їхніми функціонально-логічними частинами. У цій парадигмі ІТП перестає бути пасивним виконавчим механізмом, що відпрацьовує температурний графік, і стає активним учасником ринку, здатним прогнозувати потребу, адаптуватися до змінних тарифів та узгоджувати дії з іншими учасниками мережі.

Центральною науковою та інженерною проблемою при проектуванні таких систем є коректне формулювання цільової функції. Саме математичний вираз цілей агента визначає його поведінку, економічну ефективність та здатність забезпечити комфорт. Ця робота присвячена аналізу та формалізації цільових функцій для двох ключових класів ІТП: житлових будівель та промислових об'єктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Класичне керування ІТП через фіксовані уставки та «криві опалення» добре працює як мінімально достатня стратегія, але погано масштабується на різні будівлі та режими й створює «людський» бар'єр: налаштування уставок часто потребує високої кваліфікації й досвіду, а грубі уставки призводять до перевитрат енергії або скарг на комфорт. Це добре видно з робіт [4, 5] про перехід до низькотемпературного тепlopостачання, де температура зворотної води (i , ширше, ΔT) є критичним показником ефективності мережі, але значною мірою визначається саме споживачами – їхніми тепловими пунктами та теплоспоживальними системами. Централізована система оптимізує роботу «усередненого споживача», часто ігноруючи специфічні потреби окремого будинку чи цеху. Це призводить до конфліктів інтересів, коли глобальний оптимум мережі може порушувати локальні обмеження комфорту [6, 7].

У зв'язку з цим багато дослідників пропонують різні стратегії вдосконалення традиційних методів керування ІТП. Питання стійкості й перерегулювання для теплових пунктів досліджено в роботах про стабільність роботи теплових пунктів з позицій теорії керування [8]. Методи діагностики показують, що на теплових пунктах можна виявляти типові дефекти, такі як низький перепад температур, невідповідні теплові профілі та неякісне регулю-

вання, за даними моніторингу стану обладнання й технологічних параметрів [9]. Керування тепловим пунктом з урахуванням внутрішньої температури та інерції будівлі з потенційною сезонною економією близько 6% завдяки прогнозуванню необхідної температури води на подачі з урахуванням погодних умов та інерції будинку продемонстровано в [7]. У роботі [10] досліджено перехід від статичного температурного графіка до оптимальних законів керування, що мінімізують зворотну температуру й первинну витрату. Цифрові інтелектуальні стратегії (MPC [11], data-driven моделі [12]) перебувають у фокусі уваги дослідників і в окремих випадках експериментально демонструють позитивні результати: зокрема, приблизно 34 % зменшення середнього добового піку енергоподачі [13]; оптимізацію теплоспоживання завдяки model-free reinforcement learning методам керування [14] із заявленим одночасним підтриманням комфорту. Підходи до керування, орієнтовані на реагування на запити тепломереж, показують системні вигоди від керування піками й зміщенням навантаження [5].

Альтернативою традиційним підходам до керування контурами ІТП є також застосування мультиагентної архітектури. Система складається з множини агентів, які мають локальні знання, локальні цілі та здатність до комунікації. Дослідження [15] доводять, що MAS дозволяє досягти кращого балансу навантаження та знизити виробничі витрати без погіршення якості послуг. У таких системах обчислення проводяться на рівні контролера ІТП із залученням, за потреби, сторонніх обчислювальних і комунікаційних можливостей. Агент не просто реагує на відхилення температури, а діє на випередження, використовуючи прогноз погоди та моделі поведінки користувачів [16, 17]. Агенти можуть кооперуватися, наприклад, для згладжування піків навантаження на район, або конкурувати за ресурс [15] для забезпечення оптимізаційної стратегії вищого рівня в умовах обмежень.

Разом з тим, забезпечення стратегій енергоефективного теплоспоживання має відповідати формальним правилам і вимогам, які задають прийнятні умови для більшості людей та метрики оцінювання комфорту. Серед них варто відзначити міжнародні норми ASHRAE Standard 55 [18], який визначає комбінації факторів середовища та персональних факторів, що забезпечують задовільні теплові умови для більшості людей; ISO 7730:2025 [19], що задає аналітичну методику оцінювання загального теплового комфорту через PMV/PPD

та локальний дискомфорт; EN 16798-1:2019 [20], що визначає параметри внутрішнього середовища для проєктування та оцінювання енергоефективності. Для України варто враховувати національні прийняття європейських та міжнародних норм, зокрема ДСТУ Б EN ISO 7730:2011, ДСТУ Б EN 15251:2011 та ДСТУ EN 16798-1:2022 [21].

Постановка завдання. На основі проведеного аналізу встановлено, що існуючі підходи до керування індивідуальними тепловими пунктами переважно орієнтовані або на локальне стабілізаційне регулювання, або на окремі методи оптимізації енергоспоживання, проте не забезпечують універсального формалізованого підходу до багато-критеріального стратегічного керування в умовах змінних тарифів, ресурсних обмежень та різної функціональної ролі об'єкта теплоспоживання. У зв'язку з цим постає завдання розробити універсальну цільову функцію мультиагентної системи керування ІТП, яка б дозволяла формалізувати економічні, технологічні та мережеві критерії функціонування об'єкта, забезпечувала адаптацію стратегії керування до типу споживача та створювала основу для синтезу дворівневої кіберфізичної архітектури інтелектуального керування.

Виклад основного матеріалу. Мультиагентний підхід дозволяє переформулювати «керування уставками» у «керування цілями»: ключові показники ефективності (KPI), такі як комфорт, рахунок за тепло/енергію, пікове навантаження, надійність, «якість зворотки», явно задаються користувачем, а інтелектуальний шар агентів автоматично інтерпретує їх у локальні цілі, глобальні цілі та жорсткі обмеження, погоджені через механізми координації [5].

Для житлових ІТП «цінність» системи керування зазвичай вимірюється не уставками, а стабільністю сервісу та зрозумілими цифрами в платіжці. Мінімізація фінансових витрат є домінуючим фактором. Проте він не є лінійним, так як надмірна економія призводить до масових скарг або пошкодження будівлі через недотримання температурних режимів. Тепловий комфорт може враховувати тривалість перебування системи в комфортній зоні, показники PMV/PPD або, залежно від прийнятого стандарту, категорії внутрішнього середовища. Агент повинен прагнути утримувати показники комфорту у допустимих межах з урахуванням технічних можливостей та обмежень, які накладає постачальник тепла.

Для промисловості пріоритети зміщуються від комфорту людей до стабільності технологічних процесів та жорсткої фінансової дисципліни. Тепло

часто є частиною виробничого циклу: сушіння, підтримання мікроклімату для точного обладнання, відбори теплової енергії або теплоносія на виробничі потреби. Відхилення температури від уставки впливає на протікання виробничих процесів та якість кінцевої продукції. Окремим фактором є пікове споживання тепла енергоємними процесами, що вимагає додаткової оптимізації теплоспоживання окремими системами в часі.

Ключовим етапом у синтезі інтелектуальної системи керування є перехід від словесних описів KPI до формалізованих цільових функцій для агентів.

Для забезпечення максимальної надійності, стійкості до збурень та апаратної безпеки теплових пунктів, пропонується реалізація мультиагентної системи у вигляді дворівневої ієрархічної структури. Така архітектура органічно поєднує гнучкість децентралізованих рішень із детермінованістю класичної автоматики. Агенти контурів (Агент опалення, Агент ГВП, Агент мережі тощо) функціонують на макрорівні з певним дискретним кроком k . Шляхом переговорів та оптимізації цільової функції (1.1) вони знаходять глобальний консенсус щодо розподілу ресурсів і генерують вектор оптимальних динамічних уставок U_k^{set} . Виконавчий рівень складається з класичних ПД-регуляторів, розгорнутих на рівні ПЛК.

На макрорівні кожен локальний агент мінімізує універсальну цільову функцію на горизонті прогнозування. Незалежним аргументом оптимізації виступають динамічні цільові уставки, наприклад, температура подачі.

$$\min_{U_k^{set}} J_{agent} = \sum_{k=0}^H (w_C \cdot C_k + w_D \cdot P_{dev,k} + w_E \cdot P_{peak,k} + w_R \cdot P_{ret,k} + w_W \cdot P_{wear,k}), \quad (1.1)$$

де вектор ваг $W = [w_C, w_D, w_E, w_R, w_W]$ є унікальним ідентифікатором ролі об'єкта, а компоненти функції описують аспекти його функціонування.

Компоненти цільової функції визначаються наступним чином.

Економічний критерій C_k мінімізує фінансові витрати:

$$C_k = E_{th,k} (U_k^{set}, T_{out,k}) \cdot c(k) \quad (1.2)$$

C_k залежить від очікуваного споживання енергії $E_{th,k}$, яка потрібне для досягнення уставки U_k^{set} , зовнішнього некерованого збурення – температури $T_{out,k}$, та профілю динамічного тарифу $c(k)$.

Критерій дотримання температурного регламенту $P_{dev,k}$ формалізує вимоги до комфорту або технологічного процесу.

$$P_{dev,k} = \max(0, T_{min} - T_{zone,k})^n + \max(0, T_{zone,k} - T_{max})^m \quad (1.3)$$

Він штрафует за вихід фактичної температури $T_{zone,k}$ за межі цільового діапазону $[T_{min}, T_{max}]$. Ступені n та m визначають «жорсткість» обмежень. Наприклад, $n=2$ для еластичної зони комфорту житлового будинку; $n=4$ для критичного технологічного бар'єра у промисловості.

Критерій дотримання мережевих лімітів $P_{peak,k}$ запобігає перевантаженню локальної енергосистеми.

$$P_{peak,k} = \max(0, P_{req,k}(U_k^{set}) - E_{max,k})^2 \quad (1.4)$$

Цей критерій генерує квадратичний штраф, якщо теплова або електрична потужність $P_{req,k}$, необхідна для реалізації уставки U_k^{set} , перевищує динамічний ліміт $E_{max,k}$, виділений Агентом Мережі.

Критерій системної ефективності $P_{ret,k}$ відображає вимоги концепцій 4GDH/5GDH щодо максимального зняття тепла.

$$P_{ret,k} = \max(0, T_{ret,k}(U_k^{set}) - T_{target}(T_{out,k}))^2 \quad (1.5)$$

$P_{ret,k}$ генерує штраф, якщо фактична температура зворотного теплоносія $T_{ret,k}$ перевищує нормативне значення T_{target} , що залежить від режиму роботи тепломережі та її температурного графіка.

Критерій збереження ресурсу обладнання $P_{wear,k}$ запобігає генерації стрибкоподібних або високочастотних коливань уставок, захищаючи виконавчий рівень від нестабільності.

$$P_{wear,k} = (U_k^{set} - U_k^{set})^2 \quad (1.6)$$

Гнучкість універсальної функції та її здатність адаптуватися до різних типів споживачів досягається завдяки зміні математичної природи компонента комфорту/регламенту та відповідного вектора вагових коефіцієнтів. Оскільки мультиагентна система працює на стратегічному рівні, штрафні функції оцінюють не прямі дії виконавчих механізмів, а прогнозовані наслідки відпрацювання згенерованих уставок локальними контурами.

Роль «Житловий будинок» характеризується високим пріоритетом економічного критерію w_c та еластичністю вимог до температурного режиму. Штраф P_{dev} формалізується як поліном низького ступеня з широкою «мертвою зоною», наприклад, всередині якої $P_{dev} = 0$. Це дозволяє агенту генерувати динамічні уставки, які використовують теплову інерцію будівлі як віртуальний акумулятор енергії. Агент може свідомо задати ПІД-регулятору занижену теплову уставку для участі в програмах реагування на попит, знаючи, що прогнозоване

плавне зниження температури до нижньої межі мертвої зони не згенерує математичного штрафу, але суттєво зменшить витрати C_k .

Роль «Промисловий об'єкт» визначається домінуванням технологічного регламенту над економічними витратами. Компонент перетворюється на асиметричну експоненційну або поліноміальну бар'єрну функцію високого ступеня. Наприклад, прогнозоване падіння температури нижче критичної межі генерує штраф, що стрімко зростає на порядки. За таких умов оптимізаційне ядро мінімізує ймовірність генерації уставки, яка змусила б ПІД-регулятор знизити споживання нижче технологічного мінімуму. Більше того, така конфігурація потенційно спонукає агента застосовувати стратегію превентивного накопичення енергії.

Для верифікації запропонованого математичного апарату та оцінки адаптивності мультиагентної системи було проведено числовий експеримент із застосуванням методів псевдодинамічного моделювання на добовому горизонті. Метою експерименту є демонстрація того, як єдина універсальна цільова функція здатна генерувати принципово різні графіки динамічних уставок для виконавчого рівня регулювання залежно від обраної ролі об'єкта під впливом змінних зовнішніх збурень.

Симуляція охоплює типову 24-годинну добу з дискретним кроком оптимізації в 1 годину. На кожному кроці агенти стратегічного рівня отримують оновлені дані про зовнішні збурення і за допомогою неперервного алгоритму оптимізації розв'язують задачу мінімізації цільової функції (1.1). Як алгоритм оптимізації використано метод L-BFGS-B (Limited-memory Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno with Bounds) [22]. Результатом роботи оптимізатора на кожному кроці є розрахунок вектора оптимальних цільових уставок, які передаються як завдання на детермінований виконавчий рівень. Приймається, що локальні ПІД-регулятори забезпечують відпрацювання цих уставок у межах макрокroku з нульовою статичною похибкою. Для забезпечення репрезентативності в умовах ринку енергії наступного покоління ІТП моделюється як гібридний вузол (Power-to-Heat), де вартість генерації тепла безпосередньо залежить від багатозонного електричного тарифу.

Для розрахунку прогнозованих станів системи всередині цільової функції було використано спрощене рівняння статичного теплового балансу будівлі, яке на кожному кроці оптимізації моделює необхідну теплову потужність $P_{req,k}$ (кВт) для підтримання цільової температури $T_{zone,k}$:

$$P_{\text{req},k} = k_{\text{loss}} \cdot (T_{\text{zone},k} - T_{\text{out},k}), \quad (1.7)$$

де $k_{\text{loss}} = 1,5 \text{ кВт/}^\circ\text{C}$ – узагальнений коефіцієнт тепловтрат будівлі або контуру техпроцесу, який у даному експерименті прийнято однаковим для обох досліджуваних ролей, T_{out} – температура навколишнього середовища.

Експеримент проведено паралельно для двох віртуальних об'єктів з абсолютно ідентичними теплофізичними характеристиками (однакові коефіцієнти тепловтрат та площі, наявність жорсткого ліміту локальної мережі $E_{\text{max}} = 65 \text{ кВт}$), але з різними векторами вагових коефіцієнтів W :

– роль «Житловий будинок»: оптимізація налаштована на гнучке реагування на попит. Компонент комфорту має форму широкої мертвої зони ($19\text{--}21 \text{ }^\circ\text{C}$). Пріоритет економічного компонента високий, вектор вагових коефіцієнтів – відповідний цій ролі.

– роль «Промисловий об'єкт»: оптимізація налаштована на жорстке утримання технологічного регламенту. Компонент регламенту реалізовано як асиметричний бар'єр поліноміального ступеня, що експоненційно штрафуює систему за розрахунок уставки, яка призведе до падіння температури нижче $21 \text{ }^\circ\text{C}$. Вага штрафу за порушення регламенту на порядок перевищує економічний фактор. Вектор вагових коефіцієнтів відповідає цій ролі.

Для ізолюваного дослідження здатності системи до вирішення ресурсних конфліктів та участі в програмах реагування на попит, у даному експерименті не розглядалися гідравлічні перехідні процеси. Відповідно, вагові коефіцієнти для критеріїв температури зворотної води та зносу виконавчих механізмів були прийняті рівними нулю ($w_R = 0$, $w_W = 0$).

Для створення модельних умов, які характерні для функціонування стійких енергетичних систем громад, згенеровано комплексний профіль добових збурень, що включає чотири ключові сценарії.

1. Температура зовнішнього повітря T_{out} моделюється синусоїдальним профілем від найхолоднішого мінімуму вночі до локального максимуму вдень, що безперервно змінює фізичну потребу будівлі в тепловій потужності.

2. Задано тризонний графік вартості енергії $c(k)$: пільговий нічний тариф (00:00–07:00), стандартний денний та максимальний піковий (07:00–10:00 та 18:00–22:00).

3. Для перевірки реакції системи на дефіцит ресурсу в локальній мережі (відповідь на запити Агента мережі), змодельовано різке двократне

зниження дозволеного ліміту потужності E_{max} у вечірній час (17:00–21:00).

4. О 08:00 змодельовано ранковий пік споживання гарячої води. Цей процес має абсолютний технологічний пріоритет і жорстко резервує значну частину доступного мережевого ліміту об'єкта, створюючи штучний внутрішній дефіцит потужності для контуру опалення.

Проведені числові експерименти дозволяють оцінити ефективність застосування універсальної цільової функції на макrorівні керування ІТП. Візуалізовані результати (часові ряди – рис. 1, теплові карти – рис. 2) відображають еволюцію оптимальних динамічних уставок, які генеруються оптимізаційним ядром та передаються на базовий рівень ПЛК для відпрацювання класичними ПІД-регуляторами.

Добові графіки (рис. 1) демонструють траєкторію динамічних уставок, які мультиагентна система безперервно розраховує та передає на виконавчий рівень.

Аналіз 24-годинних часових рядів демонструє покровову адаптацію системи.

У періоди відсутності жорстких мережевих обмежень обидва агенти мінімізують споживання, утримуючи температуру на найнижчій дозволеній межі (19°C для житлового сектора, 21°C для промисловості). Оскільки в даній ітерації експерименту оптимізатор працює без предиктивного горизонту, система не здійснює превентивного перегріву будівлі в нічний час, а реагує виключно на поточний баланс тарифів.

Зниження мережевого ліміту до 30 кВт у період вечірнього екстремального дефіциту (17:00–21:00) на тлі похолодання до $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ провокує глибокий ресурсний конфлікт. За відсутності ліміту підтримання базових температур вимагало б $43,5 \text{ кВт}$ (для $19 \text{ }^\circ\text{C}$) та $46,5 \text{ кВт}$ (для $21 \text{ }^\circ\text{C}$). Система керування житловим будинком демонструє еластичність: агент знижує уставку до приблизно $18,5 \text{ }^\circ\text{C}$ у піковій точці. Це дозволяє обмежити споживання на рівні приблизно $31\text{--}32 \text{ кВт}$, що значно ближче до цільових 30 кВт . Мультиагентна система промислового об'єкта чинить опір: уставка просідає лише до приблизно $20,3 \text{ }^\circ\text{C}$, що змушує систему споживати приблизно $37\text{--}39 \text{ кВт}$, фактично ігноруючи вимогу мережі заради збереження виробництва. Різна поведінка систем визначається різними значеннями вектора вагових коефіцієнтів.

Моделювання ранкового піку демонструє реакцію на внутрішній дефіцит (рис. 2). При загальному ліміті 65 кВт та пріоритетному резервуванні 30 кВт для ГВП, безпечний залишок для опалення

становить 35,0 кВт. Зовнішня температура становить -5°C .

Аналіз топології цільових функцій демонструє кардинально різні підходи агентів до генерації уставок для ПІД-регуляторів. У випадку житлового будинку агент балансує між штрафом за дискомфорт ($w_D = 50$) та штрафом мережі ($w_E = 10$). Оптимізатор знаходить точку компромісу: цільова уставка $18,7^{\circ}\text{C}$. Для її досягнення фізично необхідно 35,6 кВт. Система приймає рішення незначно порушити ліміт мережі (на 0,6 кВт), оскільки маргінальні втрати від подальшого зниження температури перевищують мережевий штраф.

Для промислового об'єкта стратегія пошуку оптимуму інша. Асиметрична бар'єрна функція ($w_D = 500$) кардинально змінює оптимум. Для утримання суворого регламенту (21°C) знадобилося б 39,0 кВт. Агент знаходить компроміс на рівні уставки $20,4^{\circ}\text{C}$, що вимагає 38,1 кВт потужності. Це свідоме і значне (на 3,1 кВт) порушення ліміту

опалення, оскільки фінансові штрафи від Агента мережі визнаються меншими втратами, ніж зупинка технологічного процесу через критичне падіння температури.

Ці результати підтверджують, що єдина математична модель, керована виключно конфігурацією вагових коефіцієнтів, здатна генерувати адекватні, фізично достовірні стратегії керування для різних типів споживачів, забезпечуючи контрольовану деградацію режимів під час енергетичних криз.

Висновки. У роботі запропоновано та математично обґрунтовано парадигму керування індивідуальними тепловими пунктами на базі мультиагентних систем, що перетворює ІТП з пасивних споживачів на активні та гнучкі вузли сучасних енергомереж.

Ефективність дворівневої кіберфізичної архітектури: Відділення мультиагентного макрорівня прийняття рішень від базового виконавчого рівня

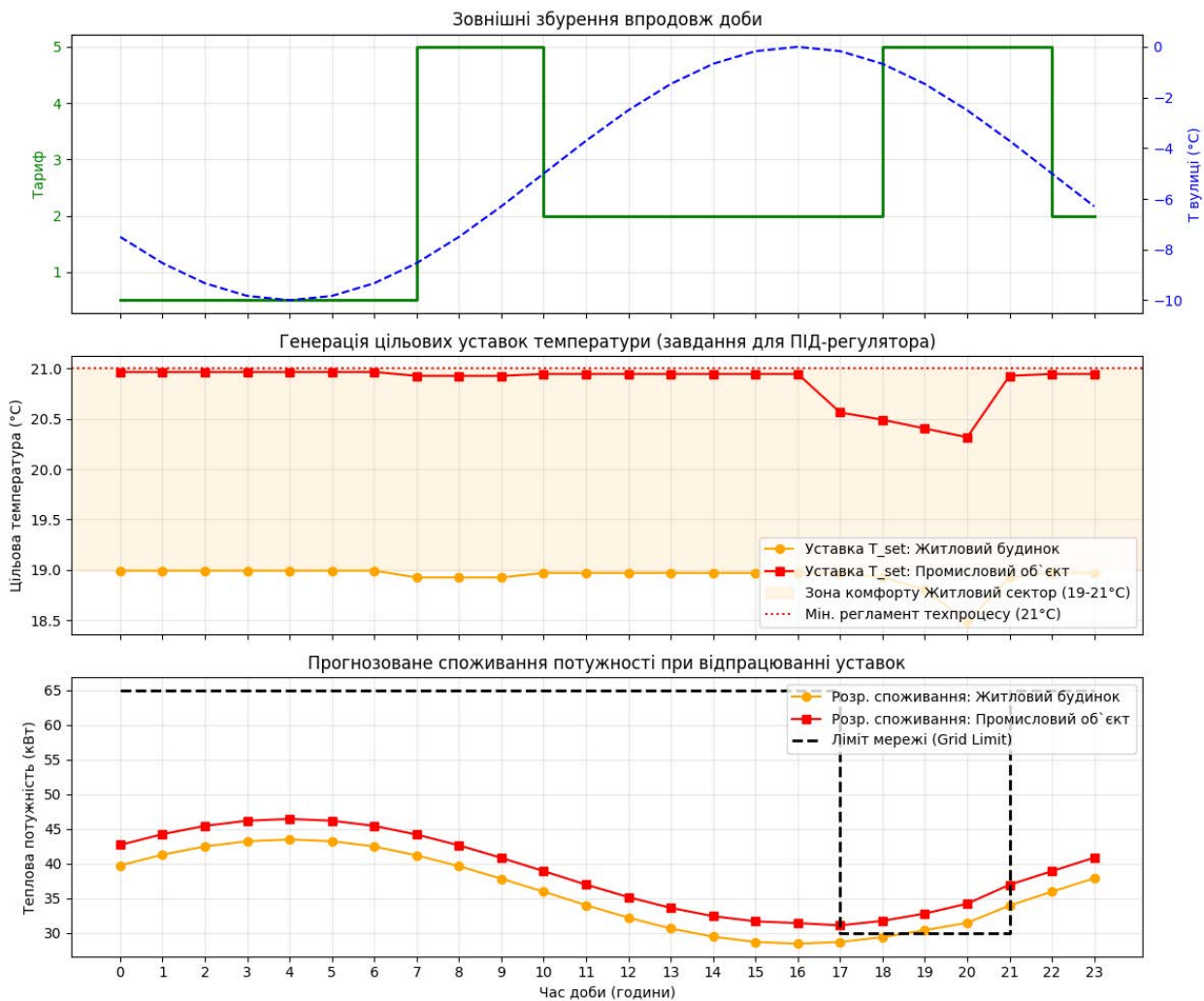


Рис. 1. Симуляція оптимізації уставок мультиагентною системою

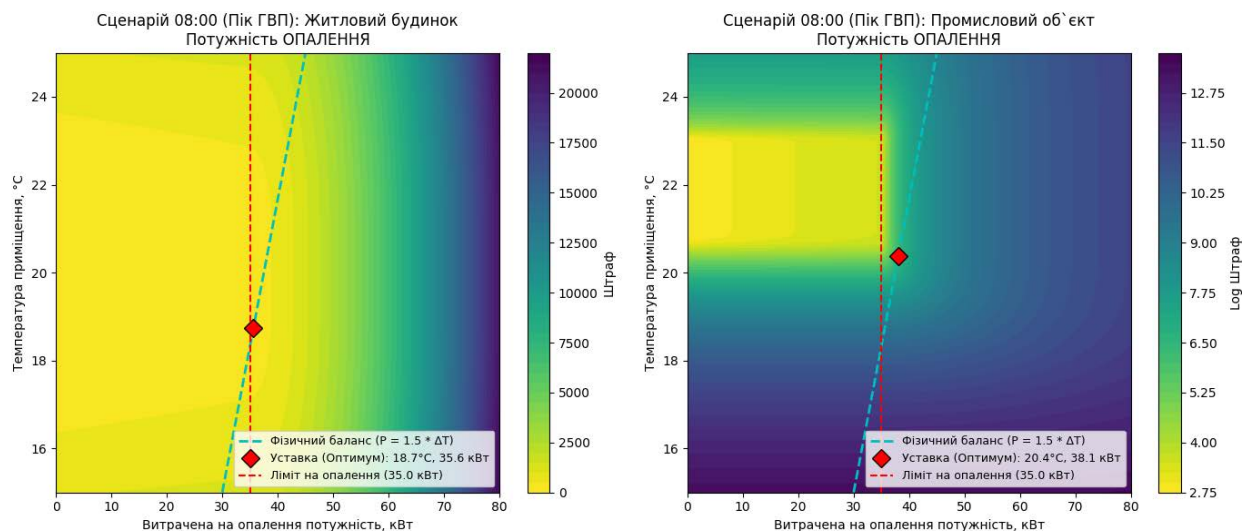


Рис. 2. Простір рішень при ресурсному конфлікті (сценарій 08:00)

регулювання – дозволяє досягти високої надійності керування. Використання алгоритмів жорсткої одновимірної оптимізації для генерації виключно цільових технологічних уставок з підпорядкуванням розрахункової потужності рівнянням теплового балансу повністю усуває ризик виникнення фізично неможливих режимів керування.

Доведено, що запропонована єдина цільова функція здатна адаптувати поведінку ІТП до будь-якої ролі об'єкта. Перехід від стратегії гнучкого споживання у житловому секторі до жорсткого утримання технологічного регламенту в промислових умовах досягається виключно шляхом реконфігурації вектора вагових коефіцієнтів та зміни математичної форми штрафної функції без втручання в базовий алгоритм.

Результати псевдодинамічного моделювання довели здатність агентів знаходити оптимальні

математичні компроміси в умовах екстремального дефіциту потужності. Система автоматично реалізує стратегію контрольованої деградації: об'єкти з високою гнучкістю діють як інструмент управління попитом, знижуючи споживання ціною допустимого дискомфорту, тоді як критична інфраструктура захищає свої показники ефективності, свідомо приймаючи фінансові штрафи мережі.

У поточній реалізації оптимізаційне ядро функціонує на базі покрокової локальної оптимізації. Наступним етапом дослідження стане розробка об'єктно-орієнтованих математичних моделей динаміки теплотехнічних об'єктів. Це дозволить інтегрувати в архітектуру повноцінний алгоритм предиктивного керування із багатокроковим горизонтом планування для реалізації складних стратегій превентивного акумулювання енергії у тепловій ємності будівель.

Список літератури:

1. Smart energy and smart energy systems / H. Lund et al. *Energy*. 2017. Vol. 137. P. 556–565. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.123> (date of access: 24.03.2026).
2. Baranchuk K., Liubarets O. Evolution of heating substation: from steam systems to thermal prosumers. *Ventilation, Illumination and Heat Gas Supply*. 2025. Vol. 53. P. 6–19. URL: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2025.53.6-19> (date of access: 24.03.2026).
3. Zdolnyk M. O., Stepanets O. V. MULTI-AGENT APPROACH TO THE ARCHITECTURE OF LOCAL AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS FOR INDUSTRIAL AND RESIDENTIAL HEAT SUPPLY FACILITIES. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. 2025. Vol. 2, no. 4. P. 133–141. URL: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.4.2/18> (date of access: 24.03.2026).
4. Testing and evaluation of a smart controller for reducing peak loads and return temperatures in district heating networks / T. Van Oevelen et al. *Smart Energy*. 2023. P. 100105. URL: <https://doi.org/10.1016/j.segy.2023.100105> (date of access: 24.03.2026).
5. Guelpa E., Verda V. Demand response and other demand side management techniques for district heating: A review. *Energy*. 2021. Vol. 219. P. 119440. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119440> (date of access: 24.03.2026).

6. Wernstedt F. Multi-agent systems for distributed control of district heating systems /. 2005. URL: <http://www.bth.se/fou/Forskinforbnsf/allfirst2/51e3dfb98bb6ba6bc1257107002f6d29?OpenDocument> (date of access: 25.03.2026).
7. A dynamic control strategy of district heating substations based on online prediction and indoor temperature feedback / C. Sun et al. *Energy*. 2021. Vol. 235. P. 121228. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121228> (date of access: 24.03.2026).
8. Operation stability analysis of district heating substation from the control perspective / Y. Wang et al. *Energy and Buildings*. 2017. Vol. 154. P. 373–390. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.034> (date of access: 24.03.2026).
9. Guelpa E., Verda V. Automatic fouling detection in district heating substations: Methodology and tests. *Applied Energy*. 2020. Vol. 258. P. 114059. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114059> (date of access: 24.03.2026).
10. Oevelen T. V., Vanhoudt D., Salenbien R. Evaluation of the return temperature reduction potential of optimized substation control. *Energy Procedia*. 2018. Vol. 149. P. 206–215. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.185> (date of access: 24.03.2026).
11. A new model predictive control approach integrating physical and data-driven modelling for improved energy performance of district heating substations / Z. Zhang et al. *Energy and Buildings*. 2023. P. 113688. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113688> (date of access: 24.03.2026).
12. Study of an Integrated Control Method for Heating Substations Based on Prediction of Water-Supply Temperature and Indoor Temperature / X. Gao et al. *Buildings*. 2022. Vol. 12, no. 3. P. 351. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings12030351> (date of access: 24.03.2026).
13. Testing and evaluation of a smart controller for reducing peak loads and return temperatures in district heating networks / T. Van Oevelen et al. *Smart Energy*. 2023. P. 100105. URL: <https://doi.org/10.1016/j.segy.2023.100105> (date of access: 24.03.2026).
14. Moshari A., Javanroodi K., Nik V. M. Real-world deployment of model-free reinforcement learning for energy control in district heating systems: Enhancing flexibility across neighboring buildings. *Applied Energy*. 2026. Vol. 402. P. 126997. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126997> (date of access: 24.03.2026).
15. Wernstedt F. Multi-Agent Systems for District Heating Management : licentiate thesis. 2003. URL: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:bth-00258> (date of access: 25.03.2026).
16. Yao R., Hu Y., Varga L. Applications of Agent-Based Methods in Multi-Energy Systems—A Systematic Literature Review. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 5. P. 2456. URL: <https://doi.org/10.3390/en16052456> (date of access: 24.03.2026).
17. Bayer D., Pruckner M. Enhancing the Performance of Multi-Agent Reinforcement Learning for Controlling HVAC Systems. 2022 *IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech)*, Corona, CA, USA, 21–23 April 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/sustech53338.2022.9794179> (date of access: 24.03.2026).
18. ANSI/ASHRAE Standard 55-2023. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta : ASHRAE, 2023. URL: <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>
19. ISO 7730:2025. Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Geneva : International Organization for Standardization, 2025. URL: <https://www.iso.org/standard/85803.html>
20. EN 16798-1:2019. Energy performance of buildings – Ventilation for buildings – Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics (Module M1-6). 2019. URL: <https://epb.center/document/en-16798-1/>
21. Щодо набрання чинності ДСТУ, які реалізують європейські підходи до мікроклімату в приміщеннях: лист; НАМН України від 20.02.2013 № 26/695 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/v0695604-13>.
22. A Limited Memory Algorithm for Bound Constrained Optimization / R. H. Byrd et al. *SIAM Journal on Scientific Computing*. 1995. Vol. 16, no. 5. P. 1190–1208. URL: <https://doi.org/10.1137/0916069> (date of access: 24.03.2026).

Zdolnyk M.O., Stepanets O.V. TARGET FUNCTIONS FOR INTELLIGENT CONTROL OF LOCAL HEAT CONSUMPTION FACILITIES IN MULTI-AGENT SYSTEMS

The article addresses the relevant scientific and practical problem of intellectualizing individual heating substations (IHS) in the context of the transition to modern 4th and 5th generation district heating systems and the implementation of the integrated Smart Energy Systems concept. Traditional automation systems,

based on rigid weather-compensated curves and local PID controllers, are unable to effectively resolve multi-criteria conflicts associated with multi-zone tariffs and dynamic constraints of local energy grids. The research objective is the development and mathematical substantiation of a universal objective function for the strategic multi-agent control level of IHS.

A two-level cyber-physical control architecture is proposed, which clearly distinguishes between the intellectual macro-level of strategic decision-making by the multi-agent system and the executive level of classical regulation. Focus is placed on the formalization of the objective function for the multi-agent control system of heat consumption objects.

Through pseudo-dynamic simulation on a daily horizon using the L-BFGS-B optimization algorithm, the efficiency and versatility of the proposed mathematical apparatus are demonstrated. It is proven that the modification of the object's role is achieved solely through the reconfiguration of the weight coefficient vector and the shape of the penalty functions. Analysis of extreme disturbance simulation results confirmed the system's ability to resolve resource conflicts. The formulation of the objective function enables the control system to execute a graceful degradation strategy: residential facilities act as flexible loads, participating in Demand Response programs and reducing consumption at the cost of acceptable discomfort, whereas industrial facilities protect their own technological processes by deliberately accepting financial penalties. The implementation of the proposed solutions transforms IHS from passive consumers into active flexible nodes capable of balancing local energy grids without compromising hardware or technological safety.

Keywords: *process automation, multi-agent control systems, heating substation, decentralized control, digital transformation.*

Дата першого надходження статті до видання: 25.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Кандиба І.О.<https://orcid.org/0000-0002-8589-4028>

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

ЗАСТОСУВАННЯ ОНТОЛОГІЙ ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ СЦЕНАРІЇВ ВСТУПНОЇ КАМПАНІЇ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ

У статті проведено дослідження можливості реалізації процесу генерації сценаріїв вступної кампанії закладу вищої освіти на основі онтологій. Проведено аналіз сучасних досліджень у галузі сценарного аналізу та моделювання вступної кампанії закладів вищої освіти. Наведено опис внутрішньої структури та особливостей обробки онтологій. Розглянуто формати збереження сформованих онтологій. Описано особливості проведення вступної кампанії закладу вищої освіти. Проаналізовано переваги використання сценарного аналізу для організації та прогнозування результатів проведення вступної кампанії. Наведено опис особливостей реалізації процесу сценарного аналізу вступної кампанії закладу вищої освіти. Визначено основні засоби програмної реалізації онтологій з використанням мови програмування Python. Визначено особливості трьох найбільш сучасних бібліотек для роботи з онтологіями. Обрано найбільш доцільний інструмент для реалізації програмного забезпечення генерації сценаріїв вступної кампанії на базі мови Python - Owlready2. На основі опитувань здобувачів визначено фактори, що вплинули на вибір ними закладу вищої освіти, для створення онтологій. Проаналізовано опитування викладачів та визначено профорієнтаційні заходи, що пов'язані з визначеними раніше факторами. Описано особливості створення онтологій засобами Owlready2 та мови програмування Python. Представлено можливість візуалізації структури онтологій у вигляді графової моделі засобами OntoGraf та Protege. Запропоновано структуру онтології вступної кампанії закладу вищої освіти, що включає фактори впливу на вибір здобувачів та профорієнтаційні заходи. Описано можливість генерації сценаріїв вступної кампанії на основі використання запропонованої онтології із застосуванням додаткового інструментарію Python. Розглянуто можливість використання спеціалізованої мови Semantic Web Rule Language для пошуку неявних зв'язків між елементами онтологій. Запропоновано шляхи вдосконалення розробленої інформаційної системи шляхом підключення засобів ШІ для обробки більшої кількості інформаційних ресурсів.

Ключові слова: онтологія, сценарний аналіз, Python, Owlready2, Semantic Web Rule Language.

Постановка проблеми: планування та прогнозування вступної кампанії закладів вищої освіти (ЗВО) під час воєнного стану є складним процесом. Частина профорієнтаційних заходів неможливо провести через небезпеку для здобувачів та складну ситуацію в енергетичній інфраструктурі України, що змушує адміністрацію ЗВО шукати нові шляхи залучення абітурієнтів та змінювати сценарії проведення вступної кампанії.

Розробка нових сценаріїв вступної кампанії для залучення абітурієнтів потребує врахування багатьох різних факторів: інтереси здобувачів, безпекова ситуація в регіоні, ситуація в енергетиці України тощо. Наприклад, наявність або відсутність сховаща у ЗВО значно впливає на вибір абітурієнта.

Врахування нових факторів при розробці сценаріїв та їхніх наслідків є складним процесом, що

вимагає застосування спеціалізованого інструментарію. Перш за все експерти, які займаються формуванням сценаріїв вступної кампанії повинні визначати фактори впливу вибору ЗВО абітурієнтами. Реалізувати цей процес можна, провівши опитування здобувачів перших курсів та безпосередньо абітурієнтів. Окрім того для реалізації збору даних можуть застосовуватись засоби штучного інтелекту (ШІ) [1 с. 209].

Підключення засобів ШІ потребує формалізованого представлення даних отриманих під час опитування абітурієнтів та інших джерел для подальшого використання при генерації сценаріїв. Моделі, що використовуються в сучасних дослідженнях, призначені для прогнозування за допомогою лише одного методу [2 с. 90] і підтримують можливість зберігання даних лише з одного дже-

рела. Проте використання онтології дозволяє усунути ці недоліки та формалізувати представлення даних, зібраних з різних джерел, що забезпечує їх використання різними програмними засобами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Профорієнтаційна діяльність ЗВО досліджується в багатьох роботах. Стаття Мокіної В. Б., Бурдейна О. В., Коваль К. О. «Метод проектування когнітивної карти для оптимізації профорієнтаційної діяльності ЗВО» [2] присвячена опису можливості оптимізації процесу проведення профорієнтаційних заходів ЗВО за допомогою використання аналізу його когнітивної моделі. У цій роботі представлено когнітивну карту, що описує взаємозв'язок чинників, які впливають на вибір абітурієнтом певного ЗВО, а також на інші чинники. Хоча авторами запропоновано модель, що описує взаємозв'язок чинників, які впливають на вибір абітурієнта, питання інтеграції нових даних та можливості використання наявної моделі для сценарного аналізу потребує подальшого дослідження.

У роботі Кандиби І. О., Фісуна М. Т., Горбаня Г. В., Антіпової К. О. «Генерація сценаріїв вступної кампанії закладу вищої освіти на основі когнітивної карти та предметно-орієнтованої мови програмування» [3 с. 100] досліджено можливість використання інформаційної системи для реалізації сценарного аналізу вступної кампанії ЗВО на основі даних, зібраних під час опитування абітурієнтів та здобувачів молодших курсів. Авторами запропоновано використання графової бази даних (БД) для збереження когнітивної карти та генерації сценаріїв. Проте питання експорту даних опитування та їх подальшого аналізу спеціалізованими інструментами потребує подальшого дослідження.

Окремим важливим напрямом досліджень є аналіз впливу мережі Інтернет на вибір ЗВО абітурієнтами. У роботі Гаріної С. М., Тверезовської Н. Т. «Дослідження зв'язку між частотою пошукових запитів цільової аудиторії та кількістю абітурієнтів закладів вищої освіти» [4, с. 32] виявлено та досліджено взаємозв'язок між частотою пошукових запитів щодо інформації про ЗВО та кількістю абітурієнтів, що подали заявки на вступ до цього ЗВО. Це дослідження допомагає визначати основні напрями роботи з інформаційними ресурсами для проведення профорієнтаційної діяльності, а саме роботу зі сторінкою університету в мережі Інтернет.

Виконаний аналіз демонструє, що сценарний аналіз активно використовується для аналізу та

прогнозування вступної кампанії закладу вищої освіти. Проте питання використання моделей зберігання даних для генерації сценаріїв потребує подальшого дослідження.

Постановка завдання. Метою дослідження є розробка інформаційної системи для генерації сценаріїв вступної кампанії ЗВО на основі онтології. Використання онтології спрощує процес підключення додаткового інструментарію аналізу даних та дозволяє генерувати знання на їх основі.

Основні завдання, які вирішуються для досягнення заявленої мети:

- 1) провести дослідження особливостей створення онтологій та реалізації сценарного аналізу;
- 2) проаналізувати інструментарій мови програмування Python для роботи з онтологіями;
- 3) реалізувати можливість генерації сценаріїв вступної кампанії на основі онтології;
- 4) продемонструвати можливість використання інструментарію аналізу онтології.

Виклад основного матеріалу. Створити формалізоване представлення процесу вступної кампанії закладу вищої освіти у вигляді чіткої структури сутностей, факторів і зв'язків між ними можна за допомогою онтології. Онтологія являє собою формалізований опис предметної галузі, що описує сутності цієї галузі, їхні властивості та зв'язки між ними у вигляді структурованої моделі знань.

Структура онтологій визначається стандартом ISO 21127:2023. Її основу становлять класи (Classes) – абстрактні поняття або категорії, що організовані в ієрархію через відношення наслідування. Далі йдуть властивості (Properties), що описують зв'язки між класами або між класами та значеннями; при цьому для кожної властивості визначається, до якого класу належить об'єкт, від якого виходить зв'язок (domain), і якого типу сутність або значення може бути його результатом (range), що дозволяє чітко задати допустиму структуру відношень в онтології. Також важливими є індивіди (Instances) – конкретні об'єкти або події реального світу, які належать до певних класів.

Онтології дедалі частіше використовуються разом із засобами ІІІ та машинного навчання як засіб структуризації знань і підвищення якості обробки даних. Завдяки формалізованому опису сутностей і зв'язків онтології забезпечують переносимість даних між різними системами, що особливо важливо для побудови складних інформаційних систем із можливістю підключення зовнішніх підсистем і модулів, що працюють зі знаннями. Онтології використовуються для представлення даних у спеціалізованих форматах

(RDF, RDFS, OWL тощо), що мають стандартизовану структуру, а їх обробка підтримується більшістю мов програмування.

Структуровані знання особливо важливі в задачах експертного оцінювання та сценарного аналізу. Сценарний аналіз представляє собою метод генерації та дослідження ймовірних варіантів розвитку подій у майбутньому шляхом побудови альтернативних сценаріїв з урахуванням різних факторів. Цей метод широко використовується в різних галузях: економіці, управлінні, кораблебудуванні та інших галузях промисловості [5 с. 19].

Однією з важливих переваг сценарного аналізу над іншими методами прогнозування є системний підхід. На відміну від методів прогнозування, заснованих на методах аналізу числових рядів, він не ізолює окремі змінні, а дозволяє аналізувати різні варіанти розвитку всієї системи. Це дає ряд переваг: можливість враховувати комплексний вплив факторів, краще розуміти ризики та наслідки рішень, передбачати наслідки впливу факторів, які неможливо визначити шляхом аналізу минулих подій [6 с. 9], підвищувати гнучкість планування і приймати більш обґрунтовані рішення в умовах невизначеності.

Актуальність сценарного аналізу у сучасному світі обумовлена швидкими темпами технологічних змін, геополітичною нестабільністю, війнами тощо. Найчастіше цей метод використовують для визначення найкращих шляхів розвитку виробництва, стратегічного планування, державного управління тощо.

Як вже було зазначено вище для реалізації цього методу прогнозування необхідно використання експертних груп та представлення їм актуальної інформації про предметну галузь. Для вирішення цієї задачі доцільним є застосування онтологій, що дозволяють представити вже структуровані дані про предметну галузь. Проте використання онтологій потребує застосування спеціалізованого інструментарію: мови програмування та відповідних бібліотек. При реалізації сценарного аналізу часто застосовується мова Python [3 с.100], що має широкий набір різноманітного інструментарію для роботи з ШІ, БД різного типу, засобів аналізу даних тощо.

Мова програмування Python підтримує широкий набір бібліотек для створення та обробки онтологій у форматах: RDF, RDFS, OWL. Серед цих бібліотек найбільш поширеними є: SPARQLWrapper, RDFlib та Owlready2.

SPARQLWrapper призначений для підключення та виконання запитів мовою SPARQL до

віддалених баз знань побудованих на онтологічній моделі, таких як DBpedia чи Wikidata за допомогою HTTP та HTTPS запитів. Варто зазначити, що SPARQL є спеціалізованою мовою запитів призначеною для роботи з даними, представленими у форматі RDF. Вона дозволяє отримувати, фільтрувати та об'єднувати інформацію з баз знань на основі онтологій.

Проте SPARQLWrapper не підтримує можливість створення та редагування онтологій або баз знань, побудованих на них, що унеможливує використання цього інструменту для реалізації сценарного аналізу на основі онтологій вступної кампанії.

RDFlib також призначена для роботи з онтологіями у форматі RDF та підтримує можливість, але лише локально без підтримки HTTP та HTTPS. Недоліками цього засобу є використання спеціалізованої структури даних для роботи з онтологіями в коді Python та відсутність можливості генерації нових знань. Генерація нових знань, наприклад виявлення нових зв'язків між сутностями є основною перевагою використання онтологій для сценарного аналізу, а отже застосовувати RDFlib є недоцільно для вирішення поставлених завдань.

Owlready2 використовує формат OWL для роботи з онтологіями та реалізує взаємодію з ними за допомогою використання класів Python, аналогічно об'єктно-реляційному представленню в реляційних БД.

На основі опитування здобувачів першого курсу були визначені фактори, що впливають на вибір ЗВО та будуть включені до онтології:

- репутація спеціальності, що зацікавила абітурієнта (ProgramReputation)
- відгуки друзів та знайомих, що навчалися у ЗВО (PeerInfluence);
- співпраця ЗВО з роботодавцями та залученість до процесу працевлаштування (EmploymentProspects);
- престиж університету (UniversityPrestige);
- навчальні дисципліни, що включені до освітньої програми (CurriculumContent);
- місце розташування ЗВО (Location);
- вплив родини (FamilyInfluence);
- якість освіти університету (UniversityQuality);
- матеріальна база (Infrastructure);
- взаємовідносини між здобувачами (SocialEnvironment);
- інформаційна обізнаність про ЗВО та навчальні програми (AwarenessLevel);
- попередній досвід: відвідування спеціалізованих курсів або гуртків (PriorExperience).

– наявність сховища та можливість проведення там занять (BombShelter);

– наявність генератора, що дозволить продовжувати навчання навіть при відключенні світла (ElectricGenerator).

Для кращої структуризації факторів використано наступні класи:

а) академічні фактори (AcademicFactor) – фактори, що пов'язані з якістю освіти в ЗВО,

б) соціальні фактори (SocialFactor) – цей клас включає рекомендації щодо вибору спеціальності та ЗВО від рідних, друзів і знайомих;

в) економічні фактори (EconomicFactor) – категорія факторів, що включає в себе вартість навчання, очікувану заробітну плату фахівців у обраній предметній галузі та всі інші аспекти, пов'язані з фінансами;

г) інфраструктурні фактори (InfrastructureFactor) – цей клас об'єднує аспекти матеріально-технічного забезпечення ЗВО та питання транспорту й проживання здобувачів під час навчання;

д) безпекові фактори (SecurityFactor) – фактори, що з'явилися під час воєнного стану та включають в себе наявність сховища і пов'язані з ним питання та можливість продовження навчання при проблемах з електропостачанням.

Перераховані фактори впливу є лише частиною онтології для генерації сценаріїв проведення вступної кампанії ЗВО. Деякі з факторів пов'язані з профорієнтаційною діяльністю викладачів. При створенні онтології вступної кампанії необхідно врахувати вплив профорієнтаційної діяльності. Для визначення типів цих робіт та їх впливу було проведено опитування серед викладачів, які безпосередньо залучені до вступної кампанії та профорієнтаційної діяльності. На основі проведеного опитування визначено та додано до онтології наступні види діяльності:

1) розміщення реклами на телебаченні (AdvertisingCampaignTV);

2) роздача друкованої рекламної продукції (AdvertisingCampaignPrint);

3) актуалізація навчальних компонентів освітньої програми (NewCourseIntroduction);

4) проведення днів відкритих дверей (OpenDayEvent);

5) розміщення рекламного матеріалу у соціальних мережах (SocialMediaPromotion);

6) проведення підготовчих курсів (ExamPreparationCourses);

7) відвідування шкіл (SchoolVisitEvent);

8) відвідування коледжів (CollegeVisitEvent);

9) залучення абітурієнтів до розважальних заходів ЗВО (StudentActivitiesEvent);

10) залучення представників ІТ компаній до профорієнтаційних робіт (ITSpecialistTeachingInvolvement);

11) проведення онлайн зустрічей з абітурієнтами (OnlineMeetingEvent);

12) участь викладачів ЗВО у шкільних олімпіадах та інших наукових заходах (ParticipationInScienceEvents);

13) покращення умов навчання (InfrastructureUpgrade);

14) участь у вступній кампанії гуртів творчої самореалізації (CreativeClubsParticipation);

15) екскурсії учнів шкіл до ЗВО (CampusTourEvent).

Для структуризації та спрощення масштабування онтології перераховані події розділено на наступні класи:

– події рекламного характеру (MarketingEvent) – клас, що включає події, пов'язані з розповсюдженням рекламних матеріалів;

– профорієнтаційні події (CareerGuidanceEvent) – клас, що включає в себе консультування абітурієнтів: проведення зустрічей з абітурієнтами, відвідування шкіл та коледжів, організація відеоконференцій для абітурієнтів та їх батьків;

– події, пов'язані з поліпшенням інфраструктури (InfrastructureEvent) – клас подій, пов'язаних з покращенням матеріально технічної бази;

– події соціального характеру (SocialEvent) – клас подій, що висвітлюють можливість творчої самореалізації здобувачів ЗВО.

Побудувати представлену онтологію можна, використовуючи досліджену раніше бібліотеку Owlready2. Ця бібліотека дозволяє описати структуру онтології за допомогою об'єктно-орієнтованої моделі, де класи самої онтології оголошуються як звичайні класи Python, що успадковуються від Thing, а ієрархія задається через спадкування.

Важливою особливістю є використання конструкції «with onto», яка визначає контекст онтології: усі класи, відношення та властивості, що також є класами Python, створені всередині цього блоку, автоматично додаються до неї. Відношення поділяються на ObjectProperty (зв'язки між об'єктами) та DataProperty (зв'язки з даними).

Зберегти отриману онтологію у форматі, що дозволяє її перенесення можливо викоиставши метод `onto.save(file='admission_factors.owl', format='rdxml')`, де `admission_factors.owl` – назва файлу, у якому буде збережено онтологію, а `rdxml` – формат збереження.

Після створення онтології для верифікації її структури можна використати графічне представлення. Це представлення полегшує проектування, аналіз онтологій, а також допомагає виявляти помилки або надлишкові зв'язки.

Одним із інструментів для реалізації згаданої візуалізації є OntoGraf – плагін у середовищі

Protégé [7 с. 25], що дозволяє відображати онтологію у вигляді графа. Він показує класи, їх ієрархію, об'єктні властивості та зв'язки між ними, а також дає змогу фільтрувати елементи. (рис. 1).

Найпростішим варіантом генерації сценаріїв є реалізація послідовного перебору та комбінування подій та факторів впливу вступної кампанії ЗВО. Для цього необхідно створити спеціалізований параметр використовуючи DataProperty та вказати кількість здобувачів, що обрали ЗВО спираючись на певний фактор або поді. Комбінування всіх можливих подій реалізується методом `itertools.combinations` з модуля `itertools` (рис. 2). Такий підхід дозволяє отримати велику кількість сценаріїв, але можлива наявність сценаріїв з взаємовиключними подіями.

Інструментарій `Owlready2` підтримує можливість використання правил `Semantic Web Rule`

Language (SWRL) [8]. SWRL являє собою мову опису правил для онтологій у форматі «якщо-то».

У контексті вступної кампанії цей механізм можна застосувати для виявлення прихованих зв'язків та відбору індивідів з параметрами «місце розташування – Миколаїв» і «фахівці, залучені до викладання»:

```
rule = Imp()
rule.set_as_rule(«»)
University(?u),
has_location(?u, ?loc),
swrlb:equal(?loc, «Миколаїв»),
has_university_factor(?u, ?f),
has_engagement(?f, ?s),
swrlb:equal(?s, «Залучені до викладання»)
-> SuitableUniversity(?u)
«»)-
```

В майбутньому планується інтегрувати модуль роботи з великими мовними моделями для аналізу

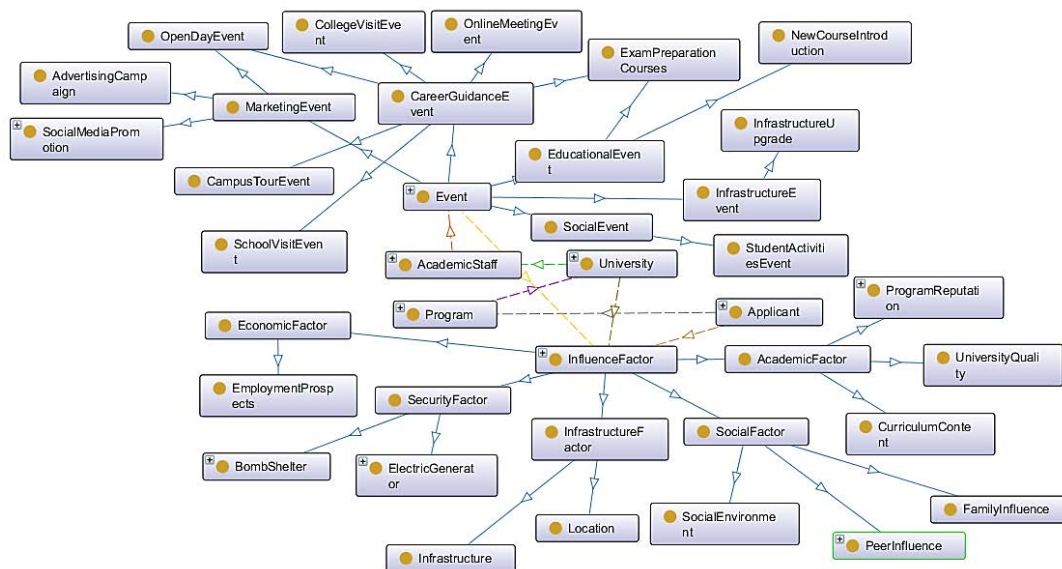


Рис. 1. Графічне представлення онтології вступної кампанії ЗВО

```
=====Згенеровані сценарії=====
{'Події': (), 'Абітурієнтів зацікавлено': 0}
{'Події': ('День відкритих дверей 2026',), 'Абітурієнтів зацікавлено': 3}
{'Події': ('Реклама в місцевих каналах Telegram',), 'Абітурієнтів зацікавлено': 4}
{'Події': ('Впровадження дисципліни: Розробка ігрових застосунків',), 'Абітурієнтів зацікавлено': 2}
{'Події': ('Проведення кількох наборів на курси підготовки до НМТ',), 'Абітурієнтів зацікавлено': 3}
{'Події': ('День відкритих дверей 2026', 'Реклама в місцевих каналах Telegram',), 'Абітурієнтів зацікавлено': 7}
{'Події': ('День відкритих дверей 2026', 'Впровадження дисципліни: Розробка ігрових застосунків',), 'Абітурієнтів зацікавлено': 5}
{'Події': ('День відкритих дверей 2026', 'Проведення кількох наборів на курси підготовки до НМТ',), 'Абітурієнтів зацікавлено': 6}
{'Події': ('Реклама в місцевих каналах Telegram', 'Впровадження дисципліни: Розробка ігрових застосунків',), 'Абітурієнтів зацікавлено': 6}
{'Події': ('Реклама в місцевих каналах Telegram', 'Проведення кількох наборів на курси підготовки до НМТ',), 'Абітурієнтів зацікавлено': 7}
{'Події': ('Впровадження дисципліни: Розробка ігрових застосунків', 'Проведення кількох наборів на курси підготовки до НМТ',), 'Абітурієнтів зацікавлено': 5}
{'Події': ('День відкритих дверей 2026', 'Реклама в місцевих каналах Telegram', 'Впровадження дисципліни: Розробка ігрових застосунків',), 'Абітурієнтів зацікавлено': 9}
{'Події': ('День відкритих дверей 2026', 'Реклама в місцевих каналах Telegram', 'Проведення кількох наборів на курси підготовки до НМТ',), 'Абітурієнтів зацікавлено': 10}
{'Події': ('День відкритих дверей 2026', 'Впровадження дисципліни: Розробка ігрових застосунків', 'Проведення кількох наборів на курси підготовки до НМТ',), 'Абітурієнтів зацікавлено': 8}
{'Події': ('Реклама в місцевих каналах Telegram', 'Впровадження дисципліни: Розробка ігрових застосунків', 'Проведення кількох наборів на курси підготовки до НМТ',), 'Абітурієнтів зацікавлено': 9}
{'Події': ('День відкритих дверей 2026', 'Реклама в місцевих каналах Telegram', 'Впровадження дисципліни: Розробка ігрових застосунків', 'Проведення кількох наборів на курси підготовки до НМТ',), 'Абітурієнтів зацікавлено': 12}
```

Рис. 2. Вивід частини згенерованих сценаріїв на основі онтології

відгуків користувачів, пошукових запитів на інформаційних ресурсах ЗВО, освітніх новини тощо.

Висновки

1) Проведено дослідження створення онтології. Описано стандартну структуру цієї моделі відповідно до стандарту ISO 21127:2023. Описано формати, що використовуються для збереження даних цієї моделі.

2) Проаналізовано інструментарій мови програмування Python, що підтримують можли-

вість роботи з онтологіями. Визначено найбільш доцільний інструмент для реалізації функціоналу генерації сценаріїв.

3) Реалізовано можливість використання онтологій у якості основи для генерації сценаріїв з використанням сутностей різних класів.

4) Продемонстровано можливість використання спеціалізованих методів пошуку прихованих зв'язків на основі методології вступної кампанії.

Список літератури:

1. Мануїлова К., Піроженко Н., Нелюб О. Штучний інтелект у стратегічному прогнозуванні потреб кадрів публічної служби. *Теоретичні та прикладні питання державотворення*. Том. 1, Випуск 34. С. 209-217. DOI: <https://doi.org/10.35432/tisb342025353084>

2. Мокін В. Б., Бурдейна О. В., Коваль К. О. Метод проектування когнітивної карти для оптимізації профорієнтаційної діяльності ЗВО. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. Вип. 3. 2018. С. 89-99.

3. Кандиба І. О., Фісун М. Т., Горбань Г. В., Антіпова К. О. Генерація сценаріїв вступної кампанії закладу вищої освіти на основі когнітивної карти та предметно-орієнтованої мови програмування. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Том. 3, Випуск 32. С. 96-104. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.3/16>

4. Гаріна С. М., Тверезовська Н. Т. Дослідження зв'язку між частотою пошукових запитів цільової аудиторії та кількістю абітурієнтів закладів вищої освіти. *Фізико-математична освіта*. 2018. №. 4. С. 31-36. DOI: <http://dx.doi.org/10.31110/2413-1571-2018-018-4-005>

5. Коваленко, І. І., Швед, А. В., Антіпова, К. О. Моделі подання та виведення знань у системах ситуаційного управління. *Ліон*. 2018. 92 с.

6. Згуровський М. З. Сценарний аналіз як системна методологія передбачення. *Систем. дослідж. та інформ. технології*. Том 1. С. 7-38.

7. Zeebaree A., Adel A. Z., Jacksi K. Designing an ontology of E-learning system for duhok polytechnic university using Protege OWL tool. *J Adv Res Dyn Control Syst Vol*. Vol. 11, 2019. P. 24-37.

8. Zhang L., Lobov A. Semantic web rule language-based approach for implementing knowledge-based engineering systems. *Advanced Engineering Informatics*. Vol. 62, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102587>

Kandyba I.O. SCENARIO GENERATION FOR UNIVERSITY ADMISSION CAMPAIGNS USING ONTOLOGIES

The paper investigates the feasibility of implementing a process for generating admission campaign scenarios for higher education institutions based on ontologies. An analysis of current research in the field of scenario analysis and modeling of admission campaigns in higher education institutions is conducted. The internal structure of ontologies and the specific features of their processing are described. The formats for storing developed ontologies are examined. The specific characteristics of admission campaigns in higher education institutions are outlined. The advantages of using scenario analysis for organizing and forecasting the outcomes of admission campaigns are analyzed. The paper also describes the specific features of implementing the scenario analysis process for admission campaigns. The main tools for ontology software implementation using the Python programming language are identified. The characteristics of three of the most modern libraries for working with ontologies are analyzed, and the most appropriate tool for developing software for admission campaign scenario generation in Python Owlready2 is selected. Based on surveys of applicants, the factors influencing their choice of a higher education institution are identified and used to construct the ontology. Surveys of academic staff are also analyzed to determine career guidance activities related to the identified factors. The features of ontology development using Owlready2 and Python are described. The possibility of visualizing the ontology structure as a graph model using OntoGraf and Protege is presented. An ontology structure for the admission campaign of a higher education institution is proposed, incorporating factors influencing applicants' choices and career guidance activities. The possibility of generating admission campaign scenarios based on the proposed ontology using additional Python tools is described. The use of the Semantic Web Rule Language for identifying implicit relationships between ontology elements is considered. Finally, directions for improving the developed information system through the integration of artificial intelligence tools for processing larger volumes of information resources are proposed.

Keywords: ontology, scenario analysis, Python, Owlready2, Semantic Web Rule Language.

Дата першого надходження статті до видання: 27.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

УДК 681.51:630

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.1/13>**Кобець В.М.**<https://orcid.org/0000-0002-4386-4103>

Херсонський державний університет

Белей О.І.<https://orcid.org/0000-0002-2386-4106>

Херсонський державний університет

ПРОЕКТУВАННЯ НИЖНЬОГО РІВНЯ АВТОМАТИЗОВАНО-ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ УРОЖАЙНОСТІ ЛІСОВИХ МАСИВІВ

У статті піднята проблема підвищення та збереження лісових масивів шляхом застосування автоматизованої-інформаційної системи. Це дозволить працівникам лісових масивів здійснювати моніторинг метеорологічних показників лісових масивів у режимі реального часу, а саме: температуру навколишнього середовища, показники з давачів температури, кількості атмосферних опадів та вологості. Саме це дозволить попередити лісові пожежі та зменшити негативний вплив паводкових вод чи селевих потоків на ділянки лісів, які прилягають до водойм. Це завданням є критично важливим, оскільки дозволить підвищити врожайність лісового господарства та зберегти лісові насадження. Спроектований нижній рівень системи "ForestO_2026" забезпечує високу інформативність завдяки інтегрованому веб-інтерфейсу. Це дозволяє здійснювати віддалений моніторинг параметрів нижнього рівня через будь-який сучасний браузер або мобільний гаджет, гарантуючи оперативний доступ до даних у режимі реального часу. Система є зручною для подальшого вдосконалення шляхом використання її для розроблення верхнього рівня автоматизовано-інформаційної системи, тобто проектування інтерфейсу. Основне призначення нижнього рівня – підвищити рівень урожайності лісового господарства щодо протипаводкової безпеки та надати чіткі, практичні рекомендації щодо дій у разі природних лих водного характеру (паводкові води чи повені) та пожеж. На основі цих даних, які видає система "ForestO_2026" є можливість вчасно оцінити потенційну небезпеку. Впровадження нижнього рівня інформаційно-автоматизованої дозволяє автоматизувати процес накопичення та обробки великих масивів інформації про стан лісового господарства. Це мінімізує похибки "людського фактора" та забезпечує високу дискретність замірів.. Створення надійного нижнього рівня автоматизації є фундаментом для побудови комплексної системи підтримки прийняття рішень, що сприяє підвищенню економічної ефективності галузі та гарантує раціональне використання природного капіталу.

Ключові слова: нижній рівень, інформаційна система, урожайність, лісові масиви, автоматизація.

Постановка проблеми. Задача підвищення урожайності лісових масивів завжди буде актуальною. Для того, щоб підвищити рівень урожайності застосовують різні автоматизовано-інформаційні технології та системи. У теперішніх умовах, збереження лісових площ – це збереження свіжого повітря, їжі (гриби, ягоди), рослин лікарського призначення, матеріалів для житла та опалення. Тому постає проблема у проектуванні систем, як дозволять зберегти ліси та підвищити їх врожайність.

Одним із таких рішень є проектування інформаційно-автоматизованої системи, а саме нижнього рівня (рівня контролерів та давачів) системи "ForestO_2026". Ця система містить різноманітні

дані про метеорологічні показники, які дозволяють підвищити ефективність реагування на водні стихії та пожежі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Створення спеціалізованих автоматизованих та інформаційних систем для моніторингу та можливого зменшення наслідків паводкових процесів, пожеж є стратегічно важливим напрямом сучасних наукових досліджень у сфері екологічної безпеки для підвищення продуктивності лісового господарства.

У [1] авторами Кобець В. М. та Белей О. І. спроектовано конфігурацію нижнього рівня системи для підвищення врожайності лісів. У науковій статті подані тільки технічні вимоги до системи,

тобто розробка є фундаментом для проектування нижнього рівня системи "ForestO_2026".

Також у статті [2] авторами López-Rodríguez G., Rodríguez-Vicente V. та Marey-Pérez M. F. розкрито дослідження продуктивності лісів під час виникнення лісових пожеж у Галісії (Іспанія). У цій статті розглядається виникнення та інтенсивність лісових пожеж, як явище, у якому поєднуються різні фактори, зокрема кліматичні, фізико-географічні, соціально-економічні та територіальні.

Розглянуто авторами Hogan J. A., Domke G. M., Zhu K., Johnson D. J. та Lichstein J. W. вплив вуглецю на збільшення частоти та інтенсивності посухи та лісових пожеж [3]. Отримані результати підкреслюють вразливість глобального поглинача вуглецю в лісах до зміни клімату та врожайності.

Моделі розроблені науковцями Hogan J. A., Domke G. M., Zhu K., Johnson D. J. та Lichstein J. W. виключно для специфічних типів лісів Північної Америки [3].

Також розглянуто розроблену авторами Li C., Barclay H., Roitberg B., Lalonde R. оглядову публікацію [4] з концепції компенсаційного росту для підвищення продуктивності лісів шляхом використання теорії та методів розроблених в інших дослідженнях компенсаційного росту. Одним з недоліків є те, що відсутній інструментарій.

Науковцями Tijerín-Triviño J., Lines E. R., Zavala M. A., García M., Astigarraga J., Cruz-Alonso V., Dahlgren J., Ruiz-Benito P. у [5] розкрито задачу, яка вказує на те, що продуктивність лісів знижується у відповідь на нещодавні зміни в структурі рослинності та кліматі на крайніх широтах Європейського континенту. Авторами не вказано механізми раннього попередження.

Проблема порушення постачання природних ресурсів через кліматичні порушення, такі як лісові пожежі та шторми розглянуто науковцями Mohr J. S., Bastit F., Grünig M., Knoke T., Rammer W., Senf C., Thom D., Seidl R. у [6]. Ця стаття фіксує увагу тільки на економічні збитки від природних катаклізмів.

У [7] спроектовано цифровий додаток Forest для управління часом та підвищення продуктивності лісів. Додаток свого роду ігровим, оскільки користувач «висаджує» віртуальне дерево, яке росте, поки додаток залишається відкритим; якщо користувач виходить з додатку, то віртуальне дерево гине. У додатку відсутній екологічний аналіз.

Розглянуто систему моніторингу врожайності FarmTRX [8], яка інтегрується з хмарним сервісом для автоматичної обробки даних та формування звітів, які допомагають аграріям оптимізувати внесення добрив та посівного матеріалу. Як недолік – це залежність від мобільності техніки.

Комплект системи моніторингу врожайності Trimble [9] дозволяє здійснювати автоматизований

процес збору даних про врожайність безпосередньо під час роботи зернозбирального комбайну. Недоліком цього універсального комплексу є відсутність моніторингу гідрологічних параметрів.

Наукові публікації розкривають різноманіття існуючих та запропонованих інформаційно-автоматизованих систем для підтримки врожайності лісового господарства, проте вони локально прив'язані до певної місцевості [10], а також вони характеризуються складністю у впровадженні, відсутністю аварійними попередженнями.

Одним із напрямків вирішення [10] є проектування нової автоматизовано-інформаційної системи нижнього рівня, яка підкаже, допоможе підвищити урожайність лісових масивів та забезпечити їх безпеку [10].

Постановка завдання. Метою статті є проектування нової автоматизовано-інформаційної системи нижнього рівня "ForestO_2026" з метою попередження підвищення, підтримки та зберігання лісового господарства.

Виклад основного матеріалу. Проектування інформаційно-автоматизованої системи нижнього рівня має надзвичайну актуальність, враховуючи низький рівень врожайності лісових масивів. Варто звернути увагу на те, що система розроблена сучасним програмним пакетом Siemens Simatic Step 7 [11]. Теоретичні основи проектування нижнього рівня "ForestO_2026" та конфігурацію апаратного забезпечення (контролер, модулі, давачі) детально описано у [1], а також показано налагодження інтерфейсного модуля ProfibusDP [1]. Система "ForestO_2026" має стати не лише надійним помічником для працівників лісового господарства, а й важливим освітнім ресурсом [10], що підвищує обізнаність студентів та учнів, сприяючи таким чином розвитку лісових насаджень та збереження екології.

Проведений аналіз існуючих систем з підтримки врожайності лісового господарства став кроком для проектування нижнього рівня "ForestO_2026" автоматизовано-інформаційної системи.

У проєкті нижнього рівня "ForestO_2026" спроектовано організаційний блок OB1, який відповідає за чотири основні функції (рис. 1):

В організаційному блоці OB1 (рис.2.4) викликаються функції:

- FC1 – функція, де відбувається нормалізація аналогових сигналів з давачів;
- FC2 – функція, де відбувається порівняння значень з давачів та заданих значень оператором проєкту (максимальних, мінімальних та середніх значень по кожному показнику);
- FC3 – функція опрацювання значень з давача опадів;

– FC4 – функція опрацювання значень з давача вологості ґрунту.

Кожна функція здійснює порівняння отриманих значень з давачів та заданих (критичних). На рис. 3 показано процес розроблення та налаштування функції на прикладі FC3.

Для імітаційного моделювання нижнього рівня системи підтримки лісового господарства "ForestO_2026" використовується програмний емулятор S7-PLCSIM. Процес передбачає завантаження проекту з актуальною конфігурацією вузла S7-300 (рис. 3.). Перевірка алгоритмів здійснюється шляхом призначення адрес вводу (MD10 та MD30), що імітують передачу даних від оператора верхнього рівня. Після активації режиму «Run» логічні ланцюги з істинними умовами (True) підсвічуються зеленим. Як демонструє рис. 3., результат операції порівняння активує маркер M1.1, що сигналізує системі моніторингу про перебування рівня в межах встановленого максимуму.

Архітектура розробленої системи "ForestO_2026", що спрямована на оптимізацію врожайності в лісових господарствах, базується на дворівневому принципі. Спроектований нижній рівень слугує фундаментом для подальшої

побудови людино-машинного інтерфейсу у середовищі WinCC [12]. Незалежність функціонування обох рівнів забезпечує гнучкість системи, дозволяючи організувати паралельний моніторинг багатьох територіально розподілених об'єктів [10].

Висновки. Спроектовано інформаційно-автоматизовану систему нижнього рівня "ForestO_2026", яка дозволить значно покращити моніторинг та зберегти лісове господарство.

Практичне значення інформаційно-автоматизованої системи нижнього рівня "ForestO_2026" полягає у:

- аналізі та контролі метеорологічних показників у одному інформаційно-автоматизованому пакеті;
- підвищенні безпеки лісового господарства;
- підтримці урожайності;
- зручності, доступності використання інтерфейсу спроектованої системи.

На подальших етапах наукового напрямку потрібно розробити верхній рівень інформаційно-автоматизованої системи нижнього рівня "ForestO_2026". Верхній рівень системи – це свого роду інтерфейс, який дозволить наочніше здійснювати моніторинг даних отриманих з давачів та заданих.

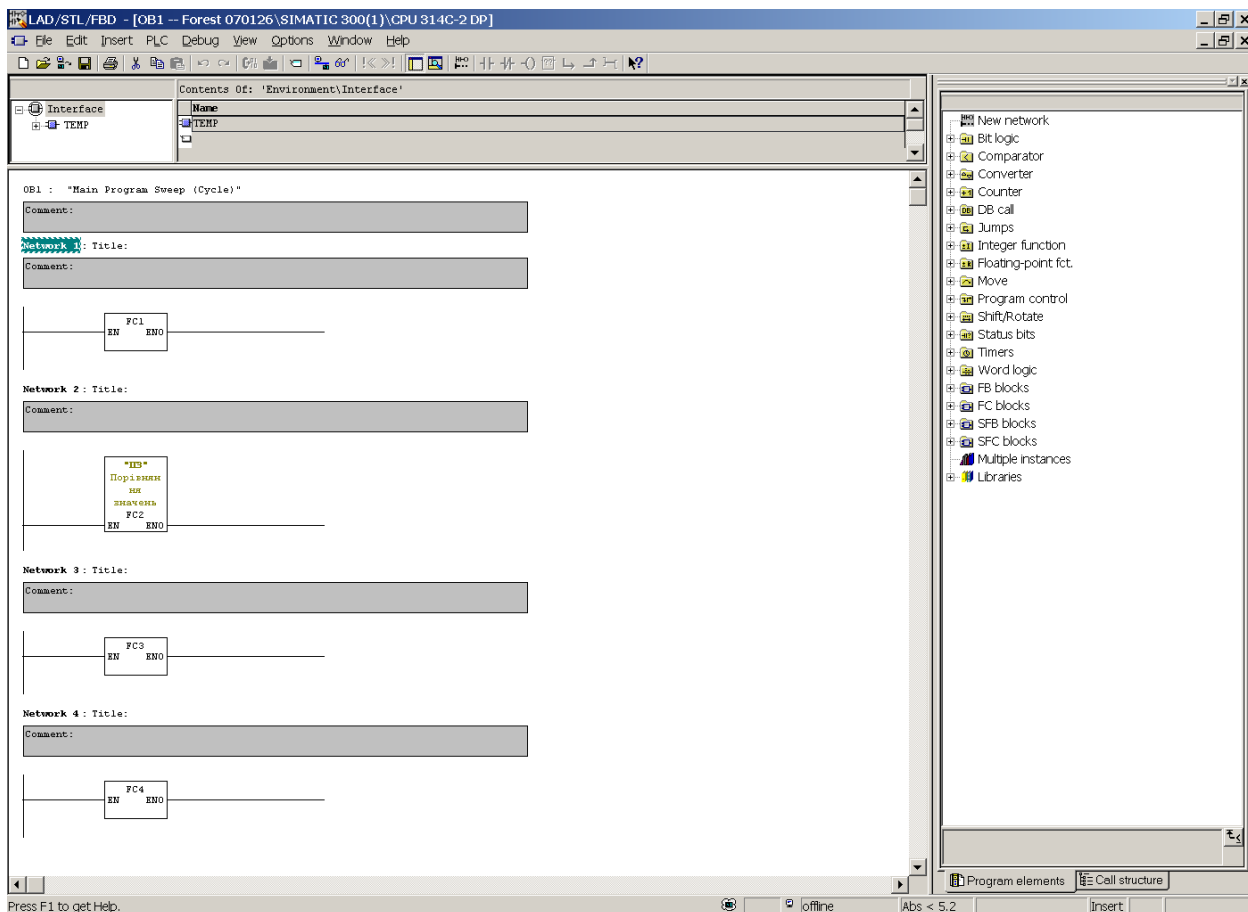


Рис. 1. Організаційний блок OB1 з чотирма функціями

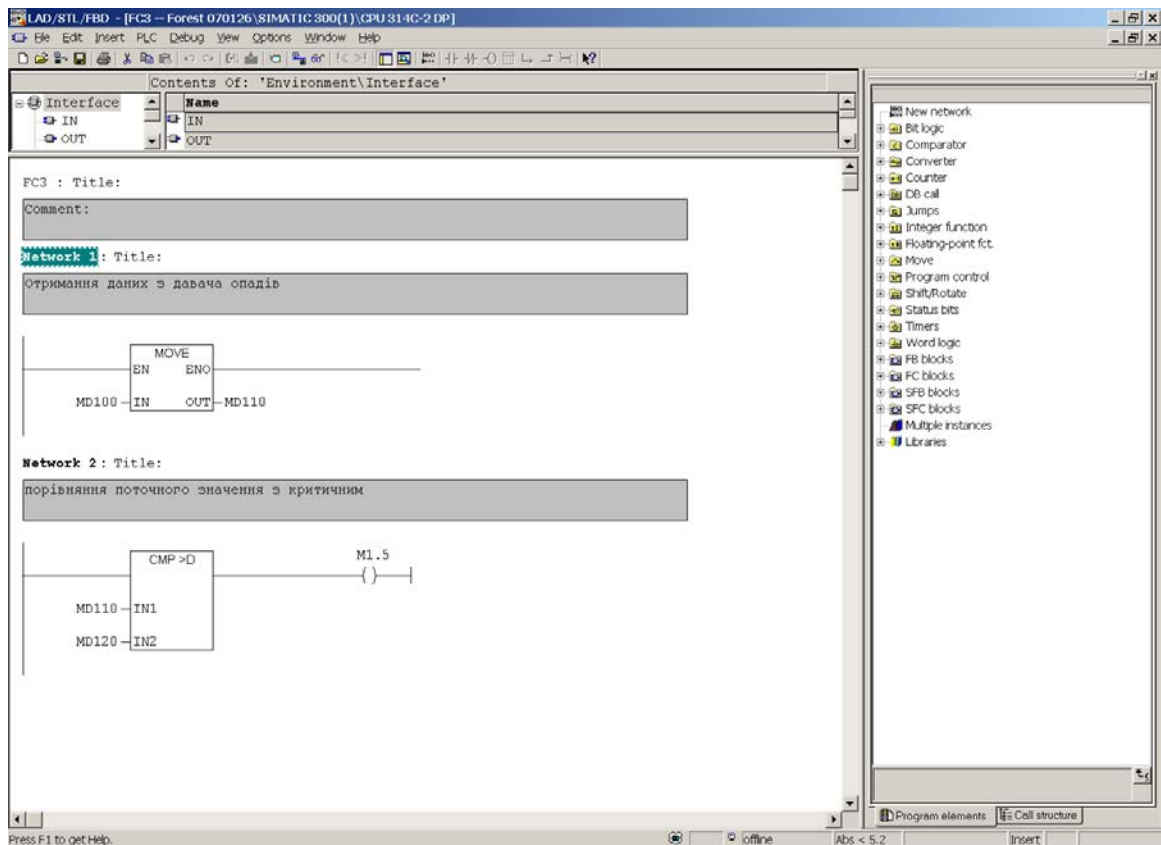


Рис. 2. Налаштування функції FC3

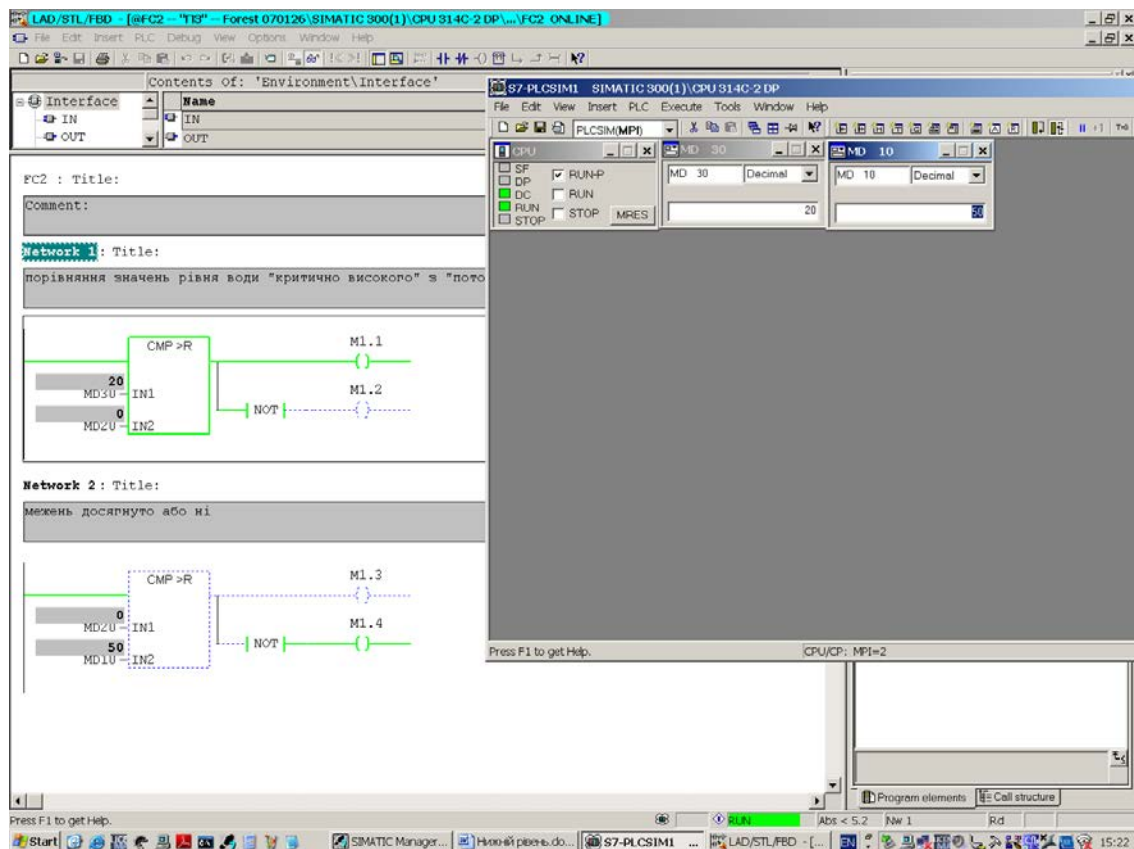


Рис. 3. Запуск проекту нижнього рівня

Доцільним є розширення функціональних можливостей інформаційно-автоматизованої системи "ForestO_2026", що дозволить попередити лісові пожежі та підтоплення лісових ділянок, які при-

легли до водойм. Системне втілення цих ідей створить підґрунтя для вдосконалення аналогічних цифрових платформ та принесе вагомий практичний результат у сфері цивільного захисту [10].

Список літератури:

1. Кобець В. М., Белей О. І. Розроблення конфігурації інформаційної системи підтримки урожайності лісового господарства. *Grail of Science*. 2025. № 59. С. 840–843. DOI: 10.36074/grail-of-science.12.12.2025.096.
2. López-Rodríguez G., Rodríguez-Vicente V., Marey-Pérez M. F. Study of Forest Productivity in the Occurrence of Forest Fires in Galicia (Spain). *Sustainability*. 2021. Vol. 13, No. 15. Art. 8472. DOI: 10.3390/su13158472
3. Hogan J. A., Domke G. M., Zhu K., Johnson D. J., Lichstein J. W. Climate change determines the sign of productivity trends in US forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*. 2024. Vol. 121, No. 4. Art. e2311132121. DOI: 10.1073/pnas.2311132121.
4. Li C., Barclay H., Roitberg B., Lalonde R. Forest Productivity Enhancement and Compensatory Growth: A Review and Synthesis. *Frontiers in Plant Science*. 2020. Vol. 11. Art. 575211. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.575211>. DOI: 10.3389/fpls.2020.575211.
5. Tijerín-Triviño J., Lines E. R., Zavala M. A., García M., Astigarraga J., Cruz-Alonso V., Dahlgren J., Ruiz-Benito P. Forest Productivity Decreases in Response to Recent Changes in Vegetation Structure and Climate in the Latitudinal Extremes of the European Continent. *Global Ecology and Biogeography*. 2025. DOI: 10.1111/geb.70011.
6. Mohr J. S., Bastit F., Grünig M., Knoke T., Rammer W., Senf C., Thom D., Seidl R. Rising cost of disturbances for forestry in Europe under climate change. *Nature Climate Change*. 2025. Vol. 15. P. 1078-1083. URL: <https://www.nature.com/articles/s41558-025-02408-9>
7. Forest: Stay focused, be present. Seekrtech Co., Ltd. 2026. URL: <https://www.forestapp.cc/>
8. Системи моніторингу врожайності (підрозділ «Основні компоненти системи FarmTRX»). URL: <https://www.agrogeo.com.ua/product-category/farmtrx-yield-monitoring>
9. Універсальний комплект системи моніторингу врожайності (Trimble). Астра-Шоп: Запчастини для с/г техніки. 2026. URL: <https://shop.astra-group.ua/ua/50-777-0002-84.html>
10. Белей О. І., Штаєр Л. О., Філюк А., Кравець О. Я. Розроблення інформаційно-довідкової системи "Floods". *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Том 36 (75). № 5, частина 2. С. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.2/01>
11. SIMATIC STEP 7 (TIA Portal) - Програмне забезпечення для програмування контролерів SIMATIC. Офіційний сайт Siemens Україна. 2026. URL: <https://www.siemens.com/uk-ua/products/tia-portal/step7/>
12. SIMATIC WinCC (TIA Portal) — Система візуалізації та оперативного керування процесами (SCADA). Офіційний сайт Siemens Україна. 2026. URL: <https://www.siemens.com/uk-ua/products/tia-portal/simatic-wincc/>

Kobets V.M. Belei O.I. DESIGN OF A LOWER LEVEL AUTOMATED INFORMATION SYSTEM FOR FOREST YIELD

The article raises the problem of increasing and preserving forest areas by using an automated information system. This will allow forest workers to monitor meteorological indicators of forest areas in real time, namely: ambient temperature, indicators from temperature sensors, the amount of precipitation and humidity. This will prevent forest fires and reduce the negative impact of flood waters or mudflows on forest areas adjacent to water bodies. This task is critically important, as it will increase forestry productivity and preserve forest stands. The designed lower level of the "ForestO_2026" system provides high information content thanks to an integrated web interface. This allows remote monitoring of lower level parameters through any modern browser or mobile gadget, guaranteeing operational access to data in real time. The system is convenient for further improvement by using it to develop the upper level of the automated information system, i.e. interface design. The main purpose of the lower level is to increase the level of productivity of forestry in terms of flood safety and to provide clear, practical recommendations on actions in case of natural disasters of a water nature (flood waters or floods) and fires. Based on these data, which are issued by the "ForestO_2026" system, it is possible to assess potential danger in a timely manner. The implementation of the lower level of information-automated allows you to automate the process of accumulating and processing large amounts of information about the state of forestry. This minimizes the errors of the "human factor" and ensures high discreteness of measurements. The creation of a reliable lower level of automation is the foundation for building a comprehensive decision-making support system, which contributes to increasing the economic efficiency of the industry and guarantees the rational use of natural capital.

Keywords: lower level, information system, productivity, forest areas, automation.

Дата першого надходження статті до видання: 23.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Корнієнко Б.Я.

<https://orcid.org/0000-0002-2521-0878>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Ладієва Л.Р.

<https://orcid.org/0000-0002-1706-0072>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Корнієнко Я.М.

<https://orcid.org/0000-0002-3031-6212>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Нестерук А.О.

<https://orcid.org/0000-0002-1563-7245>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Савіна О.О.

<https://orcid.org/0009-0006-8972-4356>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ВИРОБНИЦТВОМ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ У ГРАНУЛЯТОРІ ІЗ ПСЕВДОЗРІДЖЕНИМ ШАРОМ ІЗ НЕЧІТКИМ РЕГУЛЯТОРОМ

У статті розроблено систему управління виробництвом мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром із нечітким регулятором. Наведені основні переваги виробництва мінеральних добрив у грануляторі із псевдозрідженим шаром. Визначено основні характеристики готового продукту – гранулометричний склад та вологовміст гранул. Для створення системи управління використовувалась математична модель розподілу кількості гранул за вологовмістом та розміром. Одержані перехідна характеристика функції розподілу кількості частинок та розподіл кількості частинок за вологовмістом та розміром. Наведено теоретичні засади побудови системи управління виробництвом мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром із нечітким регулятором. Розглянуто загальну структуру нечіткого регулятора, до складу якої входять блок фазифікації, база знань, блок прийняття рішень і блок дефазифікації. Функцією блоку фазифікації є перетворення значень, отриманих на виході об'єкта управління, у нечіткі значення, що описуються лінгвістичними змінними, заданими в базі знань. На основі нечітких умовних правил, закладених у базу знань, блок прийняття рішень формує керуючі впливи з нечітких вхідних даних, причому ці впливи також подаються в нечіткій формі. Подальше перетворення результатів роботи цього блоку в чіткі значення здійснює блок дефазифікації, після чого вони можуть бути використані для управління об'єктами. Таким чином, нечітку систему доцільно застосовувати як схему управління. Для створеної системи визначено передавальну функцію та на її основі з використанням нечіткого регулятора виконано оцінку її роботи. Реалізація системи управління з нечітким регулятором дозволило значно збільшити швидкість виходу гранулятора із псевдозрідженим шаром на заданий рівень гранулометричного складу. Для створення системи також використовуються пакети Fuzzy Logic Toolbox та System Identification Toolbox програмного забезпечення MatLab.

Ключові слова: система управління, мінеральні добрива, гранулятор з псевдозрідженим шаром, нечіткий регулятор, математична модель.

Постановка проблеми: Комплексні гранульовані добрива належать до найбільш ефективних видів добрив, що використовуються в сільському господарстві. Вони характеризуються зручністю розподілу та внесення, стійкістю до впливу вітру і води, а також високим ступенем засвоєння різними рослинними культурами.

Гранулювання мінеральних добрив у псевдорозрідженому шарі є ефективним рішенням, оскільки за умови правильної побудови моделі та реалізації системи управління цей метод дає можливість формувати гранули необхідного розміру, отримувати добрива з заданою вологістю та змінювати їх склад відповідно до виробничих потреб. Для реалізації системи управління може бути використано значну кількість математичних моделей.

У зв'язку з цим виникає потреба в розробці математичної моделі процесу гранулювання у псевдорозрідженому шарі та реалізації системи управління процесом виробництва мінеральних добрив.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Процес гранулювання у псевдорозрідженому шарі може описуватися на кількох рівнях абстракції, причому вибір рівня визначається тим, на яких саме явищах зосереджене дослідження. Найбільш деталізований підхід пов'язаний з мікроскопічним масштабом, де аналізується поведінка окремої частинки та враховується її взаємодія з рідиною, елементами обладнання і сусідніми частинками [1-4]. Менш деталізований опис відповідає мезомасштабу, в межах якого частинки не розглядаються окремо, а групуються в класи за спільними характеристиками. Для кожного такого класу приймається однаковість властивостей і характеру динаміки. Найбільш узагальнений опис реалізується на макроскопічному рівні, де окремі частинки вже не виділяються, а стан шару визначається через інтегральні характеристики всієї їх сукупності. Для кожного з наведених рівнів застосовуються власні підходи до моделювання. Для мікроскопічного масштабу пропонується використовувати модель гідродинаміки,

для мезомасштабу – модель балансу, тоді як макроскопічний масштаб може бути поданий методом моментів або моделлю Лагранжа-Ейлера [5]. Крім того, для задач побудови інформаційної технології управління процесом гранулювання у псевдорозрідженому шарі розглядаються поєднана модель балансу-гідродинаміки та багатокамерна модель балансу [6].

Розглянуто основні підходи до управління режимами псевдорозрідження під час процесів нанесення покриттів і гранулювання в псевдорозрідженому шарі. Розвиток систем управління гранулюванням у псевдорозрідженому шарі повинен забезпечити роботу в стабільному режимі псевдорозрідження, що посилює тепло- і масообмін, а також задану якість готового продукту (гранулометричний склад, низький вологовміст та хороша сипучість) [7-9]. Для управління режимами псевдорозрідження використовується аналіз сигналу коливання тиску [10-12]. Для управління гранулометричним складом застосовуються методи ближньої інфрачервоної спектроскопії та вимірювання відбиття сфокусованого променя [13-16]. Для управління вологовмістом гранул розглядаються методи акустичної емісії, мікрохвильового резонансу і електроємнісна томографія [17-20]. На основі контролю температури теплоносія та температури гранул створено систему управління процесом гранулювання у псевдорозрідженому шарі [21-31].

Постановка завдання. Метою статті є розробка системи управління виробництвом мінеральних добрив в грануляторі з псевдорозрідженим шаром на основі математичної моделі розподілу кількості гранул за вологовмістом та розміром і нечіткого регулятора.

Виклад основного матеріалу. Гранульовані мінеральні добрива – це сільськогосподарські засоби підживлення рослин, які виготовляють у формі кульок, грудок або паличок. Для їх виробництва використовують органічні, мінеральні або комбіновані компоненти. При внесенні гранульованих добрив вода повільно просочується в ґрунт і поживні речовини вивільняються.



Рис. 1. Гранульовані мінеральні добрива

Розмір гранул зазвичай лежить в межах від 1,5 до 5 мм (рис. 1). Проте головним аспектом є склад компонентів, з яких сформовано добриво, а також вміст вологості в ньому.

Гранулювання належить до найпоширеніших способів виготовлення мінеральних добрив. Одержання твердих частинок із рідкого вихідного матеріалу, зокрема розчинів, емульсій і суспензій, може здійснюватися за допомогою кристалізації, гранулювання або сушіння розпиленням (рис. 2). У межах цієї схеми розчин надходить до гранулятора 1 із псевдозрідженим шаром через виконавчий пристрій 2, тоді як через виконавчий пристрій 3 вводяться центри грануляції. Рух нагрітого теплоносія, тобто повітря, організовано знизу вгору. Після завершення процесу готовий продукт у вигляді гранул вивантажується за допомогою виконавчого пристрою 4.

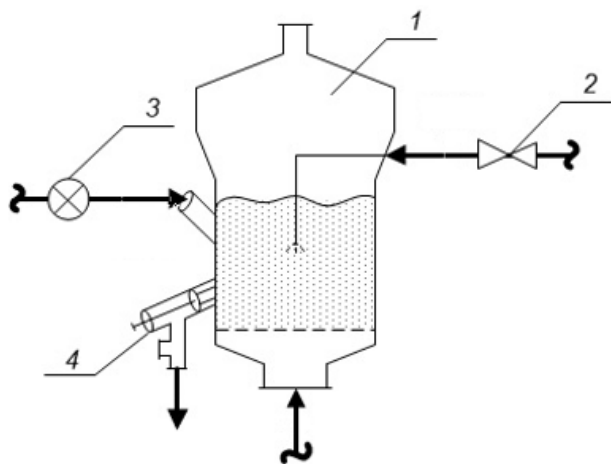


Рис. 2. Апарат для гранулювання термолабільних речовин у псевдозрідженому шарі: 1 – гранулятор, 2 – пристрій для введення вихідного розчину, 3 – пристрій для введення частинок; 4 – пристрій для вивантаження готового продукту.

Математична модель процесу гранулювання мінеральних добрив у псевдозрідженому шарі

Для опису процесу сушіння дисперсних матеріалів у псевдозрідженому шарі наведено рівняння, які в загальному вигляді враховують не лише власне сушіння і перемішування частинок матеріалу, а й додаткові ефекти, що супроводжують зневоднення та гранулювання в псевдозрідженому шарі.

У випадку, коли процес сушіння відбувається в другому періоді, матеріал практично миттєво нагрівається до температури мокрого термометра. При цьому теплоносії залишає шар з температурою, що дорівнює середній температурі матеріалу. Якщо аналіз виконувати в багатови-

мірному просторі, координатами якого виступають вміст води, розмір частинок і три просторові координати частинки, то з'являється можливість врахувати кінцеву швидкість переміщення частинок у просторі апарату, вплив змінного дисперсного складу матеріалу, кінетику процесу сушіння частинок, а також стирання, винесення і сепарацію частинок у псевдозрідженому шарі.

Як невідому функцію, для якої записується рівняння, приймають щільність розподілу матеріалу $\rho(r, \omega, R, \tau)$, тобто частку матеріалу, що перебуває в певній точці простору апарату при заданому значенні радіус-вектора r , характеризується певним вмістом води ω , радіусом R і часом перебування τ . Тоді загальне рівняння для $\rho(r, \omega, R, \tau)$ можна трактувати як матеріальний баланс частинок матеріалу в елементарному обсязі dV розглянутого багатовимірного простору [32].

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} = \text{div}(\rho \bar{v}) + \text{div}(-D_T \text{grad} \rho) - \frac{\partial \rho}{\partial \omega} \frac{d\omega}{d\tau} - \frac{\partial \rho}{\partial R} \frac{dR}{d\tau} \quad (1)$$

де D_T – коефіцієнт дифузійного перемішування.

Згідно з рівнянням (1) швидкість зміни щільності розподілу частинок в будь-якій точці псевдозрідженого шару визначається переміщенням матеріалу в просторі, тобто переходом потоку частинок матеріалу з однієї точки в іншу внаслідок вимушеного спрямованого руху (перше, конвективне доданок правої частини рівняння), перемішуванням частинок згідно з прийнятим дифузійним механізмом від більшого вмісту води до меншого внаслідок процесу сушіння (третій доданок) і переходом частинок з однієї фракції в іншу (дрібнішу) внаслідок їх стирання один про одного і про стінки апарату (останнє доданок).

Оскільки швидкість спрямованого руху дисперсного матеріалу для часток різного розміру може відрізнятися та складно піддаватися точному визначенню, під час аналізу процесів у псевдозріджених шарах доцільно використовувати так звану константу (коефіцієнт) вивантаження K_r . Для монодисперсного матеріалу ця константа записується у вигляді:

$$K_r = \frac{\int \Phi_m(\omega, \tau) d\omega}{\int \rho(\omega, \tau) d\omega} \quad (2)$$

де $\Phi_m(\omega, \tau)$ – розподіл вихідного матеріалу з вмісту води.

Швидкість зменшення розміру частинок $dR/d\tau$, як і коефіцієнт дифузійного перемішування D_T , значною мірою залежить від гідродинамічної обстановки у псевдозрідженому шарі та від меха-

нічних властивостей частинок матеріалу. В загальному випадку для конкретних умов і матеріалів значення dR/dt найбільш достовірно встановлюється експериментальним шляхом.

Швидкість сушіння частинок у найпростішому випадку, коли процес відбувається в межах одного періоду сталої швидкості, може бути подана у формі:

$$-\frac{d\omega}{d\tau} = N = \frac{cQ_2(T_0 - T_M) - Q_H}{r_c \rho_T V_T \int \rho(\omega, \tau) d\omega} \quad (3)$$

де додатково приймається, що сушильний агент під час проходження через псевдозріджений шар достатньої висоти охолоджується до температури мокрого термометра; інтегрування в знаменнику ведеться у всьому можливому інтервалі вмісту вологи матеріалу від вихідного до рівноважного; c – питома теплоємність теплоносія; Q_2 – витрата теплоносія; Q_H – теплота миттєвого нагрівання вологого матеріалу до температури T_M ; T_0 – початкова температура теплоносія, К; r_c – теплота пароутворення; V_T – обсяг частки, м³; ρ_T – щільність сухої частинки, кг/м³.

Якщо сушіння окремої частинки відбувається в послідовних періодах постійної та спадної швидкості, то рівняння (3) перестає бути справедливим, оскільки деяка частина частинок, що перебувають у шарі досить довго, сушиться в періоді спадної швидкості і температура таких частинок вище T_M , отже, і температура сушильного агента на виході з псевдозрідженого шару. Швидкість сушіння тих частинок, час перебування яких у шарі є меншим за час досягнення критичного вмісту вологи $\omega_{кр}$, у цьому випадку має бути вищою, ніж за умови сушіння всіх частинок лише в першому періоді, що зумовлено підвищенням середнього температурного рівня сушильного агента в псевдозрідженому шарі.

Для визначення швидкості сушіння в період падаючої швидкості можна вирішувати завдання тепло- та масообміну для кожної окремої частки. Однак внаслідок великої кількості різних параметрів, що характеризують тепло-і масообмін, що залежать від режиму сушіння та властивостей матеріалу, це завдання дуже складне.

Для визначення середнього вмісту вологи частинок можуть бути використані виведені спрощені рівняння. У роботах [33–36] для періоду падаючої швидкості запропоновано спрощене рівняння кінетичної кривої сушіння, одержане шляхом заміни залежності $d\omega/dt$ від ω прямою, що проходить через точку рівноважної вологості ω_p . У результаті такої заміни отримують таке рівняння:

$$\frac{d\omega}{d\tau} = -N\chi(\omega - \omega_p), \quad (4)$$

де N – є постійною величиною і залежить тільки від режиму сушіння;

$$\chi = \frac{1}{\omega_{кр} - \omega_p}; \quad (5)$$

χ – визначається властивостями матеріалу.

Аналіз значної кількості експериментальних досліджень дав підстави встановити, що коефіцієнт χ у виразі (4) істотно визначається вологістю матеріалу. Виходячи з цього запропоновано такий вираз для наведеної швидкості сушіння:

$$\psi = \frac{(\omega - \omega_p)^m}{A + \beta(\omega - \omega_p)^m}. \quad (6)$$

У виразі (6) параметри m , A , β розглядаються як безрозмірні коефіцієнти, що не залежать від вологості матеріалу. При цьому коефіцієнт m визначається без урахування розмірів і форми матеріалу. Для пористих матеріалів зазвичай приймають $m = 0,5$, для капілярних тіл $m = 1$, а для колоїдно-капілярних тіл $m = 2$. На відміну від коефіцієнта m , коефіцієнти A і β пов'язані з розмірами та властивостями матеріалу. Їх значення можуть змінювати знак, що обумовлено характером зміни температури матеріалу під час сушіння. Для визначення коефіцієнтів A і β використовується методика графічної обробки результатів експериментальних досліджень. Крім того, ці коефіцієнти задаються як функції критичної та рівноважної вологості.

Отже, швидкість сушіння в другому періоді визначається за формулою:

$$\frac{d\omega}{d\tau} = -N\psi. \quad (7)$$

Безпосередній аналіз загального рівняння (1) є складним, тому задачу сушіння зазвичай розглядають через окремі часткові випадки. Після введення відповідних спрощень це дає можливість використати рівняння (1) для розв'язання задачі сушіння, зокрема для визначення розподілу вмісту вологи на виході з апарату. Один із підходів ґрунтується на припущенні про повне перемішування матеріалу в межах усього об'єму апарату. За такої умови функція ρ вважається однорідною в просторі псевдозрідженого шару і не залежить від радіус-вектора r . У межах цього припущення окремо розглядають випадок частинок постійного однакового розміру та випадок полідисперсного матеріалу, для якого властиве стирання. Крім цього, аналізу підлягає одномірне дифузійне перемішування частинок матеріалу в напрямі його масового руху. У роботі

[37] подано розв'язання загального рівняння (1) для окремих випадків, у яких не враховуються стирання, винесення і сепарація частинок, а також не розглядається просторова неоднорідність в об'ємі псевдозрідженого шару. За таких умов функція розподілу числа частинок за вмістом води і за розміром має вигляд:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial \rho}{\partial \omega} \frac{d\omega}{dt} - \frac{\partial \rho}{\partial R} \frac{dR}{dt} + \Phi_{in}(\omega, R) - K_r \rho, \quad (8)$$

з початковими і крайніми умовами:

$$\rho(\omega, R)_{t=0} = \rho^b; \quad \rho(0, R) = \rho_\omega^0; \quad \rho(\omega, 0) = \rho_R^0;$$

де $\Phi_{in}(\omega, R)$ – вхідний потік частинок з вмістом води ω і розміром R , K_r – константа вивантаження.

Для чисельного розв'язання рівняння застосовано метод Рунге-Кутта 4-го порядку. Програмний продукт реалізовано мовою програмування Python із використанням вбудованої бібліотеки Matplotlib, призначеної для побудови графіків. З метою одержання результатів роботи математичної моделі розроблено програму, що виконує обчислення диференціального рівняння методом Рунге-Кутта та відображає графік зміни функції розподілу кількості частинок за вологовмістом і розміром (рис. 3-4).

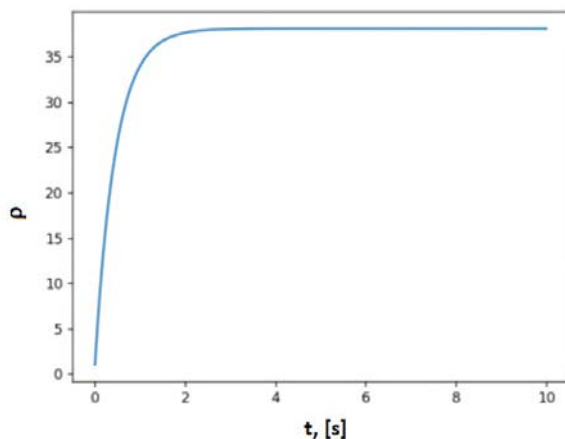


Рис. 3. Перехідна характеристика функції розподілу кількості частинок

Вологість гранул змінюється від 0 до 40 відсотків, а радіус від 0 до 5 мм. На рисунку наведено тривимірну залежність розподілу частинок за вологовмістом та розміром.

Найбільшу кількість гранул одержуємо при значенні вологовмісту близько 30% та радіусу частинок 1,5 мм, що відповідає вимогам якості для гранульованого мінерального добрива.

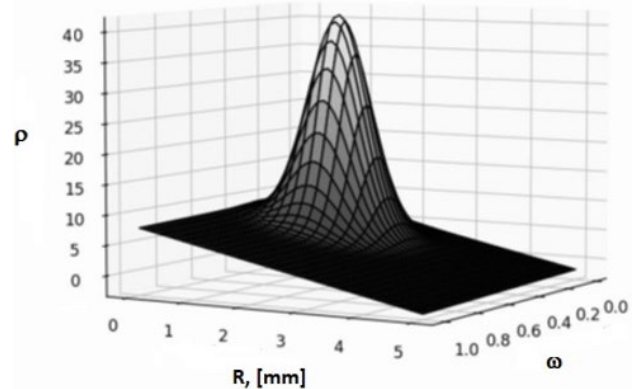


Рис. 4. Розподіл кількості частинок за вологовмістом та розміром

Система управління виробництвом мінеральних добрив з нечітким регулятором

Автоматизація виробництва належить до визначальних складових науково-технічного прогресу, оскільки забезпечує вдосконалення виробничих процесів і сприяє зменшенню витрат енергії та матеріальних ресурсів. Основним інструментом дослідження автоматизованих систем виступає математичне моделювання. При цьому створювана модель має відтворювати характеристики реальної системи з необхідною точністю.

Система управління виробництвом мінеральних добрив з нечітким адаптивним регулятором поєднує можливості нечіткої логіки та адаптивного управління для оптимізації процесів виробництва. Особливістю такої системи є здатність до самонавчання та пристосування до змінних умов і параметрів виробництва. Одним із найважливіших напрямів застосування теорії нечітких множин є використання контролерів нечіткої логіки. На відміну від звичайних контролерів, вони функціонують на основі знань експертів, які використовуються для опису системи, а не на основі диференціальних рівнянь. Такі знання можуть бути виражені за допомогою лінгвістичних змінних, визначених нечіткими множинами. Загальна структура регулятора з використанням нечіткої логіки показана на рис. 5.



Рис. 5. Загальна структура нечіткого регулятора

Загальна структура включає такі компоненти: блок фазифікації, базу знань, блок прийняття рішень та блок дефазифікації.

Блок фазифікації перетворює різні значення, виміряні на виході об'єкта управління, у нечіткі значення, визначені лінгвістичними змінними у базі знань.

Блок прийняття рішень формує необхідні керуючі впливи на основі нечітких входних даних. Для цього використовуються нечіткі умовні правила, вбудовані у базу знань, а самі керуючі впливи також задаються в нечіткій формі. Після цього блок дефазифікації виконує перетворення вихідних нечітких даних блоку прийняття рішень у чіткі значення, які надалі використовуються для управління об'єктами.

Незалежно від конкретної реалізації, системи, що використовують нечітку логіку, функціонують за спільним принципом. Значення, отримані з вимірювального пристрою, спочатку подаються в нечіткій формі, далі проходять етап обробки, після чого дефазифікуються і у вигляді звичайних сигналів надходять на виконавчі механізми.

Нечітка система може бути використана як схема управління. У розглядуваному випадку входний простір задається часовим рядом відповідних змінних. Основне завдання полягає в тому, щоб за допомогою набору нечітких правил розрізнити різні керуючі дії за їх властивостями.

Нехай існує n керуючих дій $CA_1, CA_2, \dots, CA_n$. Якщо нечітка кластеризація використовується для знаходження n пар (X_i, Y_i) , $i=1, \dots, n$, то кожна з них може бути поставлена у відповідність центру одного з n кластерів. За таких умов набір нечітких правил записується безпосередньо в такому вигляді:

$$\begin{aligned} \text{Якщо } X \in x_1 \text{ і } Y \in y_1, \text{ то } U \in CA_1 \\ \text{Якщо } X \in x_2 \text{ і } Y \in y_2, \text{ то } U \in CA_2 \\ \dots\dots\dots \\ \text{Якщо } X \in x_n \text{ і } Y \in y_n, \text{ то } U \in CA_n \end{aligned} \quad (9)$$

Сформований таким чином набір нечітких правил може бути використаний для виконання контрольного завдання через визначення відповідних значень керуючої змінної U . Для випадків більшої розмірності цей підхід також зберігає придатність і може бути розширений простим способом.

Разом з тим, однією з критичних проблем залишається експоненціальне зростання кількості правил, які потрібно виконувати. Завершення проектування нечіткої системи потребує також задання функцій приналежності для нечітких значень лінгвістичних змінних X і Y та оцінювання відпо-

відних значень їх параметрів. Загальна структура нечіткої схеми управління наведена на рис. 6.

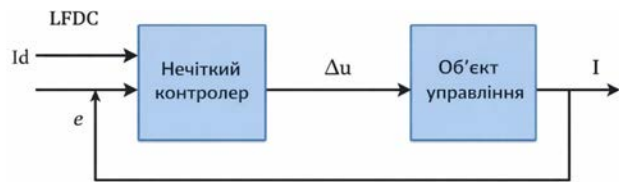


Рис. 6. Структура нечіткої схеми управління

Для побудови системи управління виробництвом мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром отримали передавальну функцію об'єкту управління за допомогою пакету Matlab – System Identification toolbox(SIT). System Identification Toolbox надає функції MATLAB, блоки Simulink і додаток для динамічного моделювання системи, аналізу часових рядів і прогнозування. Отримана передавальна функція об'єкту управління зображена на рис. 7. Перехідна характеристика об'єкту управління отримана за допомогою передавальної функції (рис. 8).

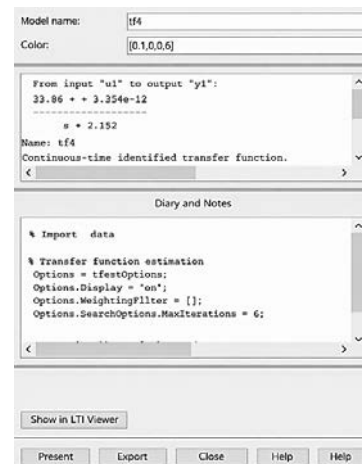


Рис. 7. Передавальна функція об'єкту управління

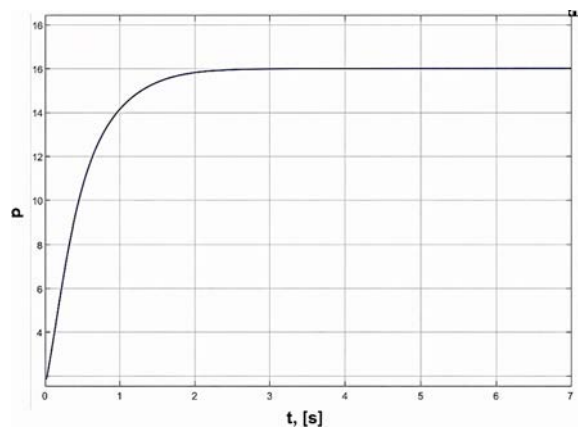


Рис. 8. Перехідна характеристика об'єкту управління отримана за допомогою передавальної функції

За допомогою Fuzzy Logic Toolbox – набору функцій, вбудованих в Matlab реалізована система управління виробництвом мінеральних добрив із нечітким регулятором (рис. 9). Отримано перехідну характеристику системи управління виробництвом мінеральних добрив із нечітким регулятором (рис. 8).

Побудована система управління виробництвом мінеральних добрив із нечітким регулятором забезпечує вихід гранулятора з псевдозрідженим шаром на заданий режим роботи на 1 с швидше, що значно підвищує ефективність управління технологічним процесом. Таким чином запропонована система управління із нечітким регулятором може бути використана для одержання гранул заданої якості (вологівміст, розмір).

Висновки. Розроблено систему управління виробництвом мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром із нечітким регулятором. Для створення системи управління використовувалась математична модель розподілу кількості гранул за вологовмістом та розміром. Визначено передавальну функцію та на її базі з використанням нечіткого регулятора проведено оцінку створеної системи. Реалізація системи управління з нечітким регулятором дозволило значно збільшити швидкість виходу гранулятора із псевдозрідженим шаром на заданий рівень гранулометричного складу.

Для створення системи також використовуються пакети Fuzzy Logic Toolbox та System Identification Toolbox програмного забезпечення MatLab.

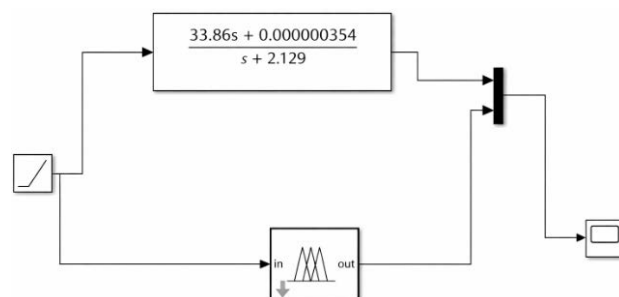


Рис. 9. Схема системи управління виробництвом мінеральних добрив з нечітким регулятором

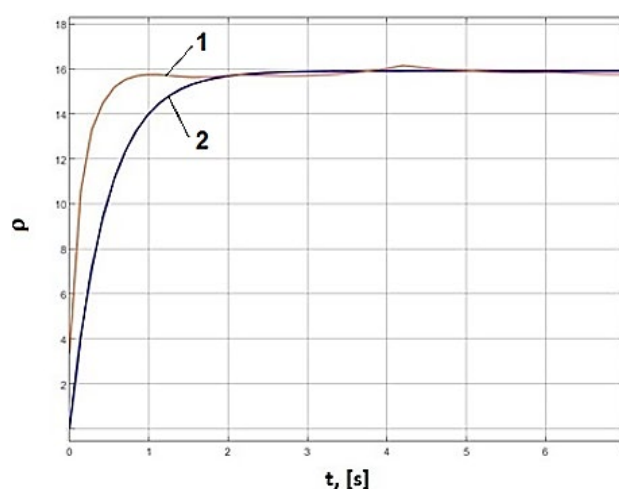


Рис. 10. Перехідна характеристика системи управління виробництвом мінеральних добрив із нечітким регулятором – 1, перехідна характеристика об'єкту управління – 2

Список літератури:

1. Bouffard J., Kaster M., Dumont H. Influence of Process Variable and Physicochemical Properties on the Granulation Mechanism of Mannitol in a Fluid Bed Top Spray Granulator. *Drug Development and Industrial Pharmacy*. 2005. Vol. 31, № 9. Pp. 923–933. DOI: 10.1080/03639040500272124.
2. Biggs C.A. et al. Fluidised bed granulation: modelling the growth and breakage kinetics using population balances. Proceedings of World Congress on Particle Technology. Sydney, Australia, 2002. Vol. 4. Pp. 629–636.
3. Rambali B., Baert L., Massart D.L. Using experimental design to optimize the process parameters in fluidized bed granulation on a semi-full scale. *International Journal of Pharmaceutics*. 2001. Vol. 220, № 1–2. Pp. 149–160. DOI: 10.1016/S0378-5173(01)00658-5.
4. Vreman A.W., van Lare C.E., Hounslow M.J. A basic population balance model for fluid bed spray granulation. *Chemical Engineering Science*. 2009. Vol. 64, № 21. Pp. 4389–4398. DOI: 10.1016/j.ces.2009.07.010.
5. van Peborgh Gooch J.R., Hounslow M.J. Monte Carlo simulation of size-enlargement mechanisms in crystallization. *AIChE Journal*. 1996. Vol. 42, № 7. Pp. 1864–1874. DOI: 10.1002/aic.690420708.
6. Gidaspow D. Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Descriptions. San Diego: Academic Press, 1994. 467 p.
7. Lipsanen T., Närvänen T., Räikkönen H., Antikainen O., Yliruusi J. Particle size, moisture, and fluidization variations described by indirect in-line physical measurements of fluid bed granulation. *AAPS PharmSciTech*. 2008. Vol. 9, № 4. Pp. 1070–1077. DOI: 10.1208/s12249-008-9147-4.
8. Johnsson F., Zijerveld R.C., Schouten J.C., van den Bleek C.M., Leckner B. Characterization of fluidization regimes by time-series analysis of pressure fluctuations. *International Journal of Multiphase Flow*. 2000. Vol. 26, № 4. Pp. 663–715. DOI: 10.1016/S0301-9322(99)00028-2.
9. Halstensen M., de Bakker P., Esbensen K.H. Acoustic chemometric monitoring an industrial granulation production process – a PAT feasibility study. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2006. Vol. 84, № 1–2. Pp. 88–97. DOI: 10.1016/j.chemolab.2006.05.012.

10. Schouten J.C., van den Bleek C.M. Monitoring the quality of fluidization using the short-term predictability of pressure fluctuations. *AIChE Journal*. 1998. Vol. 44, № 1. Pp. 48–60. DOI: 10.1002/aic.690440107.
11. Moris V.A.S., Visnadi C.B., Cunha R.L.G., Rocha S.C.S., Taranto O.P. Monitoring of fluidized bed coating process of microcrystalline cellulose. XXXII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. Maringá, Paraná, Brazil, 2006.
12. Parise M.R., Silva C.A.M., Ramazini M.J., Taranto O.P. Identification of defluidization in fluidized bed coating using the Gaussian spectral pressure distribution. *Powder Technology*. 2011. Vol. 206. Pp. 149–153. DOI: 10.1016/j.powtec.2010.07.008.
13. Nieuwmeyer F.J.S., Damen M., Gerich A., Rusmini F., van der Voort Maarschalk K., Vromans H. Granule characterization during fluid bed drying by development of a near infrared method to determine water content and median granule size. *Pharmaceutical Research*. 2007. Vol. 24, № 10. Pp. 1854–1861. DOI: 10.1007/s11095-007-9305-5.
14. Hu X., Cunningham J.C., Winstead D. Study growth kinetics in fluidized bed granulation with at-line FBRM. *International Journal of Pharmaceutics*. 2008. Vol. 347, № 1–2. Pp. 54–61. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2007.06.043.
15. Tok A., Goh X.P., Ng W., Tan R. Monitoring granulation rate processes using three PAT tools in a pilot-scale fluidized bed. *AAPS PharmSciTech*. 2008. Vol. 9, № 4. Pp. 1083–1091. DOI: 10.1208/s12249-008-9145-6.
16. Huang J., Goolcharran C., Utz J., Hernandez-Abad P., Ghosh K., Nagi A. A PAT approach to enhance process understanding of fluid bed granulation using inline particle size characterization and multivariate analysis. *Journal of Pharmaceutical Innovation*. 2010. Vol. 5, № 1. Pp. 58–68. DOI: 10.1007/s12247-010-9079-x.
17. Book G., Albion K., Briens L., Briens C., Berruti F. On-line detection of bed fluidity in gas-solid fluidized beds with liquid injection by passive acoustic and vibrometric methods. *Powder Technology*. 2011. Vol. 205, № 1–3. Pp. 126–136. DOI: 10.1016/j.powtec.2010.09.002.
18. Buschmüller C., Wiedey W., Döscher C., Dressler J., Breitzkreutz J. In-line monitoring of granule moisture in fluidized-bed dryers using microwave resonance technology. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*. 2008. Vol. 69, № 1. Pp. 380–387. DOI: 10.1016/j.ejpb.2007.09.014.
19. Wang H.G., Senior P.R., Mann R., Yang W.Q. Online measurement and control of solids moisture in fluidized bed dryers. *Chemical Engineering Science*. 2009. Vol. 64, № 12. Pp. 2893–2902. DOI: 10.1016/j.ces.2009.03.014.
20. Kornienko Y.M., Liubeka A.M., Sachok R.V., Korniyenko B.Y. Modeling of heat exchangement in fluidized bed with mechanical liquid distribution. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019. Vol. 14, № 12. Pp. 2203–2210.
21. Kornienko Y.M., Haidai S.S., Sachok R.V., Liubeka A.M., Korniyenko B.Y. Increasing of the heat and mass transfer processes efficiency with the application of non-uniform fluidization. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020. Vol. 15, № 7. Pp. 890–900.
22. Korniyenko B., Galata L., Ladieva L. Mathematical model of threats resistance in the critical information resources protection system. *CEUR Workshop Proceedings*. 2019. Vol. 2577. Pp. 281–291.
23. Korniyenko B., Kornienko Y., Haidai S., Liubeka A., Hulienko S. Conditions of nonuniform fluidization in an auto-oscillating mode. In: Hu Z., Petoukhov S., Yanovsky F., He M. (eds.) ISEM 2021. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. Vol. 463. Pp. 14–27. DOI: 10.1007/978-3-031-03877-8_2.
24. Korniyenko B., Kornienko Y., Haidai S., Liubeka A. The heat exchange in the process of granulation with non-uniform fluidization. In: Hu Z., Petoukhov S., Yanovsky F., He M. (eds.) ISEM 2021. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. Vol. 463. Pp. 28–37. DOI: 10.1007/978-3-031-03877-8_3.
25. Korniyenko B., Ladieva L. Mathematical modeling dynamics of the process dehydration and granulation in the fluidized bed. In: Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M. (eds.) ICCSEE 2020. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2021. Vol. 1247. Pp. 18–30. DOI: 10.1007/978-3-030-55506-1_2.
26. Korniyenko B., Ladieva L., Galata L. Control system for the production of mineral fertilizers in a granulator with a fluidized bed. In: 2020 2nd IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT). 2020. Pp. 307–310. DOI: 10.1109/ATIT50783.2020.9349344.
27. Korniyenko B., Galata L., Ladieva L. Research of information protection system of corporate network based on GNS3. In: 2019 IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT). 2019. Pp. 244–248. DOI: 10.1109/ATIT49449.2019.9030472.
28. Korniyenko B.Y., Ladieva L.R., Galata L.P. Mathematical model of heat transfer process of production of granulated fertilizers in fluidized bed. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2021. Vol. 16, № 20. Pp. 2126–2131.
29. Korniyenko B., Zabolotnyi V., Galata L. The optimization of the critical resource protection system of a mineral fertilizers manufacturing facility. In: Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS 2021). 2021. Vol. 1. Pp. 172–178. DOI: 10.1109/IDAACS53288.2021.9661019.

30. Galata L., Korniyenko B. Research of the Training Ground for the Protection of Critical Information Resources by iRisk Method. *Mechanisms and Machine Science*. 2020. Vol. 70. Pp. 227–237. DOI: 10.1007/978-3-030-13321-4_21.
31. Галата Л.П., Корнієнко Б.Я., Заболотний В.В. Математична модель протидії загрозам у системі захисту критичних інформаційних ресурсів. *Наукоємні технології*. 2019. Том 43. № 3. С. 300 – 306.
32. Корнієнко Б.Я., Галата Л.П. Оптимізація системи захисту інформації корпоративної мережі. *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки*. 2019. Випуск 19. С. 56-62.
33. Корнієнко Б. Я., Галата Л. П. Побудова та тестування імітаційного полігону захисту критичних інформаційних ресурсів. *Наукоємні технології*. 2017. № 4 (36). С. 316–322. doi.org/10.18372/2310-5461.36.12229.
34. Корнієнко Б.Я., Юдін О.К., Снігур О.С. Безпека аутентифікації у web-ресурсах. *Захист інформації*. 2012. № 1 (54). С. 20-25. DOI: 10.18372/2410- 7840.14.2056 (ukr).
35. Корнієнко Б. Я. Дослідження моделі взаємодії відкритих систем з погляду інформаційної безпеки. *Наукоємні технології*. 2012. № 3 (15). С. 83–89, doi.org/10.18372/2310- 5461.15.5120 (ukr).
36. Корнієнко Б.Я. Побудова та тестування імітаційного полігону захисту критичних інформаційних ресурсів. *Наукоємні технології*. 2017. № 4 (36). С. 316 - 322.
37. Korniyenko B.Y. The two phase model of formation of mineral fertilizers in the fluidized-bed granulator. *The Advanced Science Journal*. 2013. №4. P. 41-44.
38. Korniyenko B., Kornienko Y., Haidai S., Liubeka A., Hulienko S. Conditions of Non-uniform Fluidization in an Autooscillating Mode. *Advances in Computer Science for Engineering and Manufacturing. ISEM 2021 Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. No 463. P. 14-27.

Korniyenko B.Ya., Ladieva L.R., Kornienko Ya.M., Nesteruk A.O., Savina O.O. CONTROL SYSTEM FOR THE PRODUCTION OF MINERAL FERTILIZERS IN A FLUIDIZED BED GRANULATOR WITH A FUZZY CONTROLLER

The article develops a control system for the production of mineral fertilizers in a fluidized bed granulator with a fuzzy controller. The main advantages of the production of mineral fertilizers in a fluidized bed granulator are presented. The main characteristics of the finished product are determined - the granulometric composition and moisture content of the granules. A mathematical model of the distribution of the number of granules by moisture content and size was used to create the control system. The transient characteristic of the particle number distribution function and the distribution of the number of particles by moisture content and size were obtained. The theoretical principles of building a control system for the production of mineral fertilizers in a fluidized bed granulator with a fuzzy controller are presented. The general structure of the fuzzy controller is presented. The general structure includes the following components: a fuzzification block, a knowledge base, a decision-making block, and a defuzzification block. The general structure of a fuzzy controller is considered, which includes a fuzzification block, a knowledge base, a decision-making block, and a defuzzification block. The function of the fuzzification block is to transform the values obtained at the output of the control object into fuzzy values, which are described by linguistic variables specified in the knowledge base. Based on the fuzzy conditional rules embedded in the knowledge base, the decision-making block forms control influences from fuzzy input data, and these influences are also presented in a fuzzy form. The defuzzification block further transforms the results of this block into clear values, after which they can be used to control objects. Thus, it is advisable to use a fuzzy system as a control scheme. A transfer function is determined for the created system, and its performance is evaluated on its basis using a fuzzy controller. The implementation of the control system with a fuzzy controller made it possible to significantly increase the output speed of the fluidized bed granulator to a given level of granulometric composition. The Fuzzy Logic Toolbox and System Identification Toolbox packages of the MatLab software are also used to create the system.

Keywords: control system, mineral fertilizers, fluidized bed granulator, fuzzy controller, mathematical model.

Дата першого надходження статті до видання: 17.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Короткіх В.М.<https://orcid.org/0009-0004-1783-2513>

Національний університет «Львівська політехніка»

КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ПОШУКОВОЇ СИСТЕМИ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЄКТУВАННЯ

У статті розглянуто проблему організації інтелектуального пошуку інженерних даних у системах автоматизованого проєктування, де значні обсяги CAD-файлів, креслень, специфікацій і супровідних атрибутів накопичуються протягом усього життєвого циклу виробу. Показано, що традиційний пошук за назвою файлу, автором, датою створення або окремими текстовими полями не забезпечує достатньої повноти й релевантності, оскільки не враховує геометричну структуру, топологічні зв'язки, функціональне призначення елементів і контекст використання проєктного рішення. Метою роботи є формування концептуальної моделі пошукової системи для САПР, яка поєднує семантичний пошук, онтологічне моделювання, граф знань і векторне подання інженерних даних. Запропонована модель описує узгоджену послідовність етапів: отримання та нормалізацію CAD-даних, декомпозицію моделей і креслень, виділення геометричних, топологічних та атрибутивних ознак, побудову семантичних анотацій, формування векторних подань, індексацію у векторній базі даних, інтерпретацію запиту користувача, семантичне зіставлення та ранжування результатів. Особливу увагу приділено ролі онтології предметної області, яка задає спільний словник понять, властивостей і відношень, а також графа знань, що фіксує зв'язки між моделями, деталями, матеріалами, технологічними операціями, стандартами та функціями виробу. На відміну від підходів, орієнтованих лише на зовнішню подібність форми, концептуальна модель спрямована на врахування конструкторського наміру та можливість повторного використання інженерних рішень за змістом. У роботі не подаються результати експериментального тестування; запропонований підхід розглядається як архітектурна й методологічна основа для подальшої реалізації прототипу, добору метрик релевантності та перевірки на реальних наборах CAD-файлів. Практичне значення моделі полягає у створенні передумов для скорочення часу пошуку, зменшення дублювання проєктних рішень, підвищення інтеоперабельності між CAD, PDM і PLM-середовищами та підтримки цифрового виробництва в умовах Industry 4.0.

Ключові слова: САПР, CAD, семантичний пошук, онтологія, граф знань, векторне подання, інженерні дані, повторне використання проєктних рішень.

Постановка проблеми. Сучасні системи автоматизованого проєктування (CAD) широко застосовуються в інженерній діяльності для створення, редагування та зберігання технічної документації у векторних форматах. У процесі розробки складних виробів формується значний обсяг графічних даних, що включає креслення, схеми, специфікації та інші типи документів. Зі зростанням кількості таких даних актуалізується проблема їх ефективного пошуку, повторного використання та інтеграції [1].

Існуючі підходи до організації пошуку в CAD-системах переважно базуються на метаданих (назва файлу, автор, дата створення) або текстових атрибутах, що супроводжують графічні об'єкти. Проте такі методи не враховують змістовну (семантичну) складову креслень і не дозволяють

здійснювати пошук за геометричними характеристиками, топологічними зв'язками чи функціональним призначенням елементів. У результаті користувачі стикаються з труднощами при знаходженні релевантних документів, особливо у великих архівах технічної документації [2].

Додатковою проблемою є різномірність форматів CAD-файлів (наприклад, DXF, DWG, SVG тощо), що ускладнює уніфікований підхід до їх аналізу та індексації. Відсутність єдиної концептуальної моделі, яка б враховувала як геометричні, так і семантичні аспекти графічних об'єктів, обмежує можливості створення ефективних пошукових систем у цій галузі.

Таким чином, виникає необхідність у розробці концептуальної моделі пошукової системи CAD-файлів, яка забезпечить: формалізоване представ-

лення структури графічних даних, інтеграцію геометричних і семантичних характеристик об'єктів, підтримку інтелектуального пошуку за змістом креслень, підвищення ефективності повторного використання інженерних рішень.

Розв'язання цієї проблеми є важливим для підвищення продуктивності проектування, зменшення дублювання розробок та забезпечення ефективного управління знаннями в інженерних системах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема пошуку та повторного використання CAD-моделей досліджується в кількох взаємопов'язаних напрямках: атрибутивний і текстовий пошук, геометричний пошук за формою, використання дескрипторів і графових подань, семантичне збагачення моделей, а також застосування методів машинного та глибокого навчання. Систематичний огляд сучасних підходів до пошуку 3D CAD-моделей у проектуванні машинних деталей показує, що ефективно повторне використання наявних моделей може скорочувати цикл розроблення, однак потребує врахування не лише подібності форми, а й вимог конкретної стадії проектування [1, с. 752–774].

Перші практичні підходи до організації пошуку були пов'язані з аналізом назв файлів, каталогів, атрибутів документа та текстових описів. Їхньою перевагою є простота реалізації та сумісність із більшістю наявних файлових сховищ. Однак вони суттєво залежать від дисципліни заповнення метаданих, мови опису, локальних правил найменування та повноти супровідної документації. У застарілих архівах частина таких даних часто відсутня або є суперечливою, тому пошук за ключовими словами не забезпечує повного відтворення інженерного змісту моделі.

Другий напрям пов'язаний із геометричним пошуком, у якому CAD-модель описується через глобальні або локальні дескриптори форми. До глобальних дескрипторів належать статистичні характеристики, моменти, розподіли відстаней, орієнтацій або проєкцій; до локальних – ознаки окремих конструктивних елементів, таких як отвори, пази, фаски, кишені, ребра жорсткості чи поверхні певного типу. Огляд 3D object recognition and classification демонструє різноманіття подань тривимірних об'єктів і критеріїв порівняння, але також фіксує залежність результату від якості виділення ознак і вибору міри подібності [4, с. 1243–1292].

Важливим різновидом геометричних методів є пошук на основі регіональної сегментації та

топологічних зв'язків. Наприклад, подання моделі через області, грані, ребра й відношення суміжності дозволяє відображати не лише зовнішню форму, а й структуру об'єкта. Дослідження 3D CAD solid model retrieval based on region segmentation показує доцільність використання регіонів моделі для пошуку подібних твердотільних об'єктів [6, с. 103–121]. Водночас графові методи, зокрема подання B-Rep як графа суміжності граней, створюють основу для зіставлення підструктур і пошуку часткових відповідностей [5].

Окремий напрям формують підходи на основі багатовидових проєкцій. У view-based підході тривимірна модель перетворюється на набір двовимірних зображень із фіксованих ракурсів, після чого задача пошуку може бути інтерпретована як задача розпізнавання видів. Така логіка використана у фреймворку повторного використання 3D CAD-моделей протягом життєвого циклу продукту, де глибинні моделі застосовуються для пошуку за множиною проєкцій [2, с. 82–89]. Перевагою підходу є сумісність із методами комп'ютерного зору, а обмеженням – потенційна втрата точної параметричної та топологічної інформації.

Значний інтерес становлять методи глибокого навчання. Вони дають змогу будувати векторні подання складних геометричних об'єктів, однак вимагають підготовлених наборів даних і уніфікованого формату вхідної інформації. У роботах щодо реконструкції 3D CAD-моделей з технологічними ознаками та розпізнавання machining features використано нейронні мережі для роботи з воксельними, дескрипторними або комбінованими поданнями [3, с. 114–127; 7]. Такі підходи є перспективними, проте для інженерного пошуку важливо зберігати зв'язок результатів нейронної моделі з вихідними CAD-елементами, інакше користувач отримує лише числову подібність без пояснюваного обґрунтування.

Для інтеграції CAD і CAM важливими є методи автоматичного розпізнавання конструктивно-технологічних ознак. Огляд automatic feature recognition techniques систематизує підходи, які використовують графові правила, об'ємну декомпозицію, евристики, нейронні мережі та гібридні рішення для переходу від геометрії до виробничого змісту [8, с. 83–109]. Для пошукової системи це означає, що релевантність має визначатися не лише за схожістю поверхонь, а й за інженерною інтерпретацією: наприклад, чи є елемент отвором під кріплення, посадковим місцем, технологічною кишенею або декоративною формою.

Семантичний пошук і онтологічне моделювання становлять окремий пласт досліджень. Семантичне збагачення низькорівневих CAD-моделей у PLM-середовищах спрямоване на відновлення зв'язків між геометрією, стандартами, функціями та життєвим циклом виробу [9]. Онтологія дає змогу формалізувати класи об'єктів, властивості, відношення, ієрархії та правила виводу, а граф знань – зберігати й оновлювати конкретні зв'язки між екземплярами. У працях із методології knowledge graphs підкреслюється, що граф знань поєднує дані, схеми та семантичні зв'язки в структурі, придатній для пошуку, інтеграції й логічного виводу [11].

Аналіз публікацій свідчить, що жоден із розглянутих підходів окремо не розв'язує проблему універсального пошуку CAD-даних. Атрибутивний пошук простий, але семантично обмежений; геометричні дескриптори відображають форму, але не завжди фіксують функцію; глибоке навчання забезпечує узагальнені векторні подання, але потребує пояснюваності; онтології структурують знання, проте самі по собі не гарантують швидкого масштабованого пошуку у великих архівах. Отже, актуальною є гібридна концептуальна модель, у якій онтологія, граф знань і векторне подання працюють як взаємодоповнювальні компоненти.

Постановка завдання. Метою статті є розроблення та опис концептуальної моделі пошукової системи в системах автоматизованого проектування, орієнтованої на семантичний аналіз CAD-файлів і повторне використання інженерних рішень. Модель має визначити загальну архітектуру, основні інформаційні потоки, функції ключових модулів і принципи взаємодії між геометричним, семантичним та векторним рівнями подання даних.

Для досягнення мети поставлено такі дослідницькі завдання: уточнити особливості CAD-даних як об'єкта пошуку; визначити набір ознак, які мають враховуватися під час індексації; описати роль онтології та графа знань у нормалізації термінів і встановленні зв'язків між об'єктами; запропонувати схему формування векторних подань для моделей, креслень і запитів користувача; окреслити механізм ранжування результатів на основі комбінованої релевантності.

Предметом розгляду є не конкретна програмна реалізація пошукового сервісу, а архітектурно-методологічний рівень. Тому в роботі не декларуються експериментально виміряні показники точності, швидкодії або повноти пошуку. Висновки

стосуються логіки побудови моделі, її очікуваних переваг, обмежень і напрямів подальшої перевірки на реальних наборах CAD-файлів.

Об'єктом моделювання є інформаційний простір САПР, що включає CAD-файли різних форматів, векторні креслення, метадані, специфікації, матеріали, технологічні параметри, зв'язки з PDM/PLM-системами та запити користувачів. Кінцевим результатом має бути схема, придатна для подальшого переходу до прототипу семантичної пошукової системи.

Виклад основного матеріалу. Концептуальна модель пошукової системи в САПР ґрунтується на припущенні, що інженерний документ має багаторівневу природу. На синтаксичному рівні він є файлом певного формату; на геометричному рівні – набором примітивів, поверхонь, граней, ребер, кривих або елементів креслення; на атрибутивному рівні – сукупністю назв, розмірів, матеріалів, допусків і параметрів; на семантичному рівні – носієм понять про функцію, конструктивне призначення та технологічний контекст. Пошукова система повинна поєднувати ці рівні, інакше вона або втрачає зміст, або не масштабується до великих архівів.

Першим компонентом моделі є рівень джерел даних. До нього належать CAD-файли у форматах STEP, IGES, DWG, DXF, SVG, STL та нативних форматах CAD-платформ; пов'язані специфікації; технічні описи; бібліотеки стандартних виробів; дані PDM/PLM; історія версій і зміни, внесені в модель. На цьому рівні важливо фіксувати походження даних, версію формату, одиниці вимірювання, систему координат і зв'язки між документами. Така інформація надалі використовується для перевірки сумісності результатів і для пояснення, чому певний файл потрапив до пошукової видачі.

Другим компонентом є модуль попередньої нормалізації. Його завдання полягає у приведенні різнорідних даних до внутрішнього подання, зручного для аналізу. Нормалізація охоплює вилучення службових дублювань, уніфікацію одиниць вимірювання, стандартизацію назв шарів і атрибутів, розпізнавання типів примітивів, виділення структури складання та перевірку наявності критичних полів. Для креслень важливо відокремити графічні об'єкти, розмірні лінії, позначення, текстові виноска та штампи, оскільки кожен із цих елементів має різну роль у пошуку.

Третім компонентом є декомпозиція CAD-об'єкта й виділення ознак. Для твердотільних моделей це можуть бути поверхні, грані, ребра,

отвори, фаски, пази, кишені, різьби, посадкові елементи, симетрії та повторювані патерни. Для двовимірних креслень – контури, вузли, розміри, типи ліній, блоки, шари та текстові пояснення. Ознаки доцільно поділяти на геометричні, топологічні, атрибутивні та контекстні. Геометричні характеризують форму; топологічні – зв'язки; атрибутивні – властивості; контекстні – місце об'єкта в складі виробу або процесі проектування.

Четвертим компонентом є семантична анотація. На цьому етапі виділені ознаки співвідносяться з поняттями предметної області. Наприклад, геометричний елемент, який має циліндричну форму та певні розмірні характеристики, може бути інтерпретований як отвір, посадкове місце або технологічний канал залежно від його зв'язків із іншими елементами. Семантична анотація не повинна зводитися до автоматичного присвоєння тегів. Вона має враховувати ієрархію понять, синонімію, варіанти назв, стандартизовані терміни та обмеження конкретної галузі.

Онтологія предметної області в запропонованій моделі виконує роль формалізованого словника. Вона задає класи об'єктів, властивості, типи відношень і допустимі правила інтерпретації. Наприклад, класи «деталь», «вузол», «отвір», «фаска», «матеріал», «операція оброблення», «стандарт» можуть бути пов'язані відношеннями «входить до складу», «має матеріал», «виконує функцію», «виготовляється операцією», «відповідає стандарту». Наявність онтології дає змогу зменшити неоднозначність запитів і забезпечує узгодженість між різними CAD-платформами.

Граф знань доповнює онтологію конкретними екземплярами та зв'язками. Якщо онтологія описує загальні правила, то граф знань фіксує, що певна модель містить певну деталь, ця деталь має матеріал, пов'язана з технологічною операцією, використовувалась у попередньому виробі та має аналог в іншому проекті. Графове подання особливо корисне для пошуку за непрямыми зв'язками. Користувач може шукати не файл із конкретною назвою, а, наприклад, деталі, які виконують подібну функцію, виготовляються подібною операцією або використовують однаковий стандарт.

П'ятий компонент моделі – формування векторного подання. Векторне подання (embedding) перетворює об'єкт або запит у числовий простір, де близькість векторів відображає змістову, геометричну або комбіновану подібність. Для CAD-даних вектор може формуватися з кількох підвекторів: геометричного, топологічного, тек-

стового, атрибутивного та семантичного. Геометричний підвектор відображає форму; топологічний – структуру зв'язків; текстовий – назви й описи; атрибутивний – параметри; семантичний – поняття, отримані з онтології та графа знань.

Векторна база даних використовується для швидкого пошуку найближчих об'єктів у багатовимірному просторі. Вона не замінює онтологію та граф знань, а забезпечує масштабовану інфраструктуру для попереднього відбору кандидатів. Після отримання множини найближчих векторів система може виконати додаткове семантичне фільтрування, перевірку обмежень і ранжування. Такий гібридний підхід дає змогу поєднати швидкодію векторного пошуку з пояснюваністю, яку забезпечують онтологічні та графові зв'язки.

Обробка запиту користувача в моделі передбачає кілька сценаріїв. Запит може бути текстовим, наприклад «знайти кронштейн із двома отворами під кріплення»; графічним, коли користувач подає ескіз або фрагмент креслення; прикладовим, коли як запит використовується наявна CAD-модель; комбінованим, коли текстове пояснення доповнюється геометричним прикладом. Для кожного сценарію система має побудувати внутрішню модель запиту, виділити ключові поняття, зіставити їх з онтологією і сформувати відповідне векторне подання.

Семантичне розширення запиту є необхідним для подолання синонімії та різних традицій найменування. Наприклад, поняття «кронштейн», «опора», «тримач» або «монтажна пластина» в окремих контекстах можуть бути близькими, але не тотожними. Онтологія повинна задавати ієрархію та зв'язки між такими термінами, а граф знань – підказувати, як вони реально використовувались у попередніх проектах. Завдяки цьому система може знайти релевантні результати навіть тоді, коли користувач не повторює точну назву з архіву.

На етапі зіставлення система порівнює модель запиту з індексованими CAD-об'єктами. Зіставлення має бути багатокритеріальним: текстова близькість важлива для назв і описів; геометрична – для форми; топологічна – для структури; семантична – для функції та контексту; атрибутивна – для матеріалів, розмірів і параметрів. Тому релевантність доцільно розглядати як зважену комбінацію кількох показників, а не як один універсальний коефіцієнт.

У загальному вигляді комбіновану релевантність можна подати так:

$$\text{Rel}(q, d) = \alpha \cdot \text{Ssem}(q, d) + \beta \cdot \text{Sgeom}(q, d) + \gamma \cdot \text{Stop}(q, d) + \delta \cdot \text{Stext}(q, d) + \varepsilon \cdot \text{Smeta}(q, d), \text{ де } q -$$

запит, d – документ або модель, S_{sem} – семантична близькість, S_{geom} – геометрична подібність, $Stop$ – топологічна подібність, S_{text} – текстова близькість, S_{meta} – відповідність метаданих, а α , β , γ , δ , ε – вагові коефіцієнти, які налаштовуються відповідно до предметної області.

Подана формула має концептуальний характер. Вона не задає фіксованих значень ваг і не претендує на універсальність для всіх CAD-середовищ. У машинобудуванні більшу вагу може мати топологія й технологічні ознаки; у будівельному проектуванні – класи об'єктів і нормативні параметри; у бібліотеках стандартних виробів – атрибути та відповідність стандарту. Тому модель передбачає можливість адаптації ваг і правил ранжування до конкретного застосування.

Загальна архітектура запропонованої пошукової системи наведена на рис. 1. Вона розділяє офлайн-індексацію інженерних даних і онлайн-обробку запиту користувача. Офлайн-контур виконує декомпозицію, семантичну анотацію, побудову векторних подань та наповнення векторної бази даних. Онлайн-контур аналізує запит, формує його embedding, звертається до індексу, виконує семантичне зіставлення, ранжує результати й передає зворотний зв'язок для подальшого уточнення словників та онтології.

Важливою властивістю моделі є інтероперабельність. Вона досягається завдяки внутрішньому проміжному поданню, яке відокремлює логіку пошуку від конкретного CAD-формату. Перетворювачі форматів відповідають за імпорт і первинне виділення структурних елементів, тоді як семантичне ядро оперує вже нормалізованими поняттями та зв'язками. Такий підхід дає змогу розширювати

систему новими форматами без радикальної зміни модулів ранжування і графа знань.

Ще однією властивістю є пояснюваність результатів. Для інженера недостатньо отримати список файлів, впорядкований за абстрактним числовим балом. Система має пояснювати, які саме ознаки збіглися: подібна конструктивна функція, однаковий тип з'єднання, близькі розміри, відповідність стандарту, наявність аналогічних технологічних операцій або спільний контекст використання. Пояснюваність підвищує довіру до результатів і дає змогу користувачу швидше оцінити, чи справді знайдена модель придатна для повторного використання.

Зворотний зв'язок користувача повинен використовуватися не лише для персоналізації видачі, а й для уточнення семантичного шару. Якщо інженер позначає результат як релевантний або нерелевантний, система може накопичувати інформацію про типові помилки інтерпретації, уточнювати ваги ознак, розширювати словник синонімів і виявляти відсутні зв'язки в графі знань. При цьому важливо відокремлювати індивідуальні вподобання користувача від загальнодомених правил, щоб не погіршити якість пошуку для інших спеціалістів.

У межах PLM або PDM-середовища запропонована модель може виконувати роль інтелектуального пошукового шару. Вона не обов'язково замінює наявні сховища документів, а інтегрується з ними через індексаційні конектори та API. Такий шар може підтримувати пошук аналогів, виявлення дублювання моделей, пошук деталей за функціональним призначенням, навігацію між варіантами конструкції, перевірку відповідності

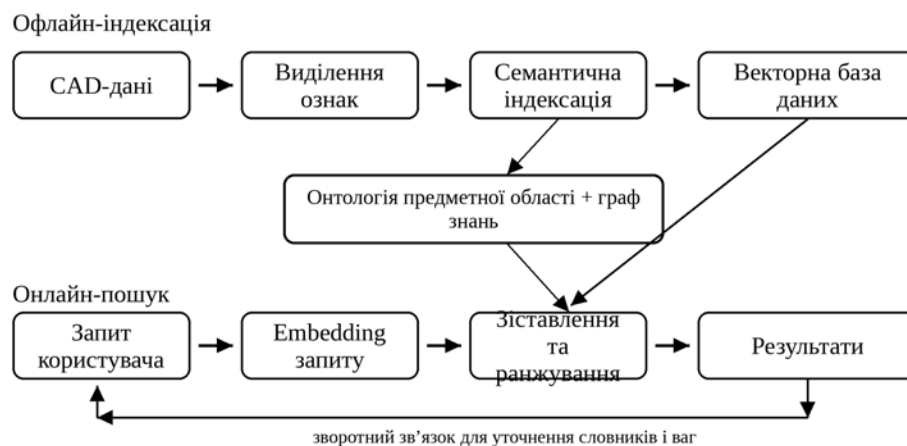


Рис. 1. Концептуальна архітектура системи пошуку CAD-даних

стандартним елементам і підготовку наборів даних для подальшого машинного навчання.

Під час практичної реалізації потрібно враховувати обмеження доступу до інженерних даних. CAD-файли можуть містити комерційно чутливу інформацію, тому індексація має підтримувати ролі користувачів, контроль прав доступу, журналювання запитів і механізми вилучення застарілих або конфіденційних версій. Векторна база даних і граф знань повинні зберігати посилання на оригінальні файли так, щоб результат пошуку не порушував політик безпеки підприємства.

Запропонована концептуальна модель не обмежується пошуком за готовою моделлю. Вона також може бути використана для підтримки ранніх стадій проєктування, коли користувач має лише приблизний функціональний опис або ескіз. У цьому випадку система виконує роль помічника, який пропонує наявні рішення, схожі конструктивні вузли або релевантні фрагменти знань. Такий сценарій особливо цінний для навчання молодих інженерів і для організацій, де частина досвіду зберігається не у формальних документах, а в архівах попередніх проєктів.

Отже, модель забезпечує перехід від файлового пошуку до пошуку в просторі інженерних знань. Її ключова ідея полягає в тому, що CAD-об'єкт одночасно індексується як геометрична структура, текстовий документ, набір атрибутів, семантичний вузол графа знань і вектор у просторі подібності. Саме поєднання цих подань створює основу для пошуку, орієнтованого на зміст, а не лише на збіг слів або зовнішню схожість форми.

Висновки. У статті запропоновано концептуальну модель пошукової системи в системах автоматизованого проєктування, яка поєднує семантичний пошук, онтологічне моделювання, граф знань і векторне подання інженерних даних. Модель спрямована на подолання обмежень традиційного пошуку за метаданими та ключовими словами, оскільки враховує геометричні, тополо-

гічні, атрибутивні й функціональні характеристики CAD-об'єктів.

Визначено основні компоненти архітектури: рівень джерел даних, модуль нормалізації, декомпозицію та виділення ознак, семантичну анотацію, онтологію предметної області, граф знань, формування векторних подань, векторну базу даних, інтерпретацію запиту, семантичне зіставлення та ранжування результатів. Показано, що ефективний пошук у CAD-архівах потребує гібридної логіки, у якій швидкодія векторного пошуку поєднується з пояснюваністю онтологічного та графового шару.

Окреслено принцип комбінованої релевантності, у межах якого результат оцінюється за сукупністю семантичної, геометричної, топологічної, текстової та метаданих-близькості. Наголошено, що вагові коефіцієнти такого оцінювання мають добиратися відповідно до предметної області й типу інженерних задач, а наведена формалізація має концептуальний, а не експериментально підтверджений характер.

Практичне значення запропонованої моделі полягає у створенні основи для інтелектуального пошукового шару, який може інтегруватися з CAD, PDM і PLM-системами, підтримувати повторне використання проєктних рішень, зменшувати дублювання моделей і полегшувати роботу з великими архівами інженерних даних. Модель також може бути корисною для побудови навчальних і виробничих сервісів, орієнтованих на доступ до накопиченого інженерного досвіду.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на реалізацію прототипу, формування тестового набору CAD-файлів, вибір і порівняння метрик подібності, розроблення онтології для конкретної галузі, експериментальне налаштування ваг релевантності та перевірку якості пошуку на текстових, графічних і комбінованих запитах. Окремим напрямом є дослідження пояснюваності результатів і механізмів керованого зворотного зв'язку користувача.

Список літератури:

1. Ning F., Shi Y., Tong X., Cai M., Xu W. A review and assessment of 3D CAD model retrieval in machine-part design. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2025. Vol. 38, No. 6. P. 752–774. DOI: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2024.2382196>
2. Zhang C., Zhou G. A view-based 3D CAD model reuse framework enabling product lifecycle reuse. *Advances in Engineering Software*. 2019. Vol. 127. P. 82–89. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2018.09.001>
3. Lee H., Lee J., Kim H., Mun D. Dataset and method for deep learning-based reconstruction of 3D CAD models containing machining features for mechanical parts. *Journal of Computational Design and Engineering*. 2022. Vol. 9, No. 1. P. 114–127. DOI: <https://doi.org/10.1093/jcde/qwab072>
4. Carvalho L. E. R., von Wangenheim A. 3D object recognition and classification: a systematic literature review. *Pattern Analysis and Applications*. 2019. Vol. 22, No. 4. P. 1243–1292. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10044-019-00804-4>

5. Chen J., Ilies H. T., Ding C. Graph-Based Shape Analysis for Heterogeneous Geometric Datasets: Similarity, Retrieval and Substructure Matching. *Computer-Aided Design*. 2022. Vol. 143. Article 103125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2021.103125>
6. Tao S., Wang S., Chen A. 3D CAD solid model retrieval based on region segmentation. *Multimedia Tools and Applications*. 2017. Vol. 76, No. 1. P. 103–121. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-015-3033-3>
7. Yeo C., Kim B. C., Cheon S., Lee J., Mun D. Machining feature recognition based on deep neural networks to support tight integration with 3D CAD systems. *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. Article 22147. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01313-3>
8. Meka S., Dowluru S., Dumpala L. Automatic Feature Recognition Techniques for the Integration of CAD and CAM: A Review. *Smart and Sustainable Manufacturing Systems*. 2024. Vol. 8, No. 1. P. 83–109. DOI: <https://doi.org/10.1520/SSMS20230016>
9. Nzetchou S., Durupt A., Remy S., Eynard B. Semantic Enrichment Approach for Low-Level CAD Models Managed in PLM Context: Literature Review and Research Prospect. *Computers in Industry*. 2022. Vol. 135. Article 103575. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103575>
10. Ning F., Shi Y., Cai M., Xu W. Part machining feature recognition based on a deep learning method. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2023. Vol. 34. P. 809–821. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01827-7>
11. Fensel D., Şimşek U., Angele K., Huaman E., Kärle E., Panasiuk O., Toma I., Umbrich J., Wahler A. Knowledge Graphs: Methodology, Tools and Selected Use Cases. Cham: Springer, 2020. 148 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-37439-6>

Korotkykh V.M. CONCEPTUAL MODEL OF A SEARCH SYSTEM IN COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEMS

The article addresses the problem of organizing intelligent retrieval of engineering data in computer-aided design environments, where large collections of CAD files, drawings, specifications and accompanying attributes are accumulated throughout the product life cycle. It is shown that conventional search based on file names, authors, creation dates or isolated textual fields is not sufficient for high recall and relevance, because it does not capture the geometric structure, topological relations, functional purpose of elements and the context in which a design solution is used. The aim of the study is to formulate a conceptual model of a search system for CAD environments that combines semantic search, ontology-based modeling, a knowledge graph and vector representations of engineering data. The proposed model describes a coordinated sequence of stages: acquisition and normalization of CAD data, decomposition of models and drawings, extraction of geometric, topological and attribute features, creation of semantic annotations, generation of vector representations, indexing in a vector database, interpretation of the user query, semantic matching and ranking of results. Particular attention is paid to the role of the domain ontology, which defines a common vocabulary of concepts, properties and relations, and to the knowledge graph, which records links between models, parts, materials, technological operations, standards and product functions. Unlike approaches focused only on external shape similarity, the conceptual model is intended to take design intent into account and to support reuse of engineering solutions according to their meaning. The paper does not report experimental evaluation results; the proposed approach is considered as an architectural and methodological basis for further implementation of a prototype, selection of relevance metrics and validation on real CAD datasets. The practical significance of the model lies in creating prerequisites for reducing search time, decreasing duplication of design work, improving interoperability among CAD, PDM and PLM environments and supporting digital manufacturing under Industry 4.0 conditions.

Keywords: CAD, computer-aided design, semantic search, ontology, knowledge graph, vector representation, engineering data, design reuse.

Дата першого надходження статті до видання: 20.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Кривуля Г.Ф.

<https://orcid.org/0000-0002-6143-5628>

Харківський національний університет радіоелектроніки

Зигін С.Є.

<https://orcid.org/0009-0003-3537-7713>

Харківський національний університет радіоелектроніки

ВИЯВЛЕННЯ КЕРУЮЧИХ СИГНАЛІВ ПРИ КЕРУВАННІ БЕЗПІЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ СИСТЕМАМИ В УМОВАХ НАЯВНОСТІ ІНТЕНСИВНИХ ЗАВАД

Дана робота присвячена питанню виявлення сигналів керування в системах зв'язку безпілотних літальних апаратів (БпЛА), що функціонують відповідно до стандарту 802.11. Сучасні безпілотні системи дедалі ширше використовуються як у цивільній, так і у військовій сферах, що висуває підвищені вимоги до надійності їхніх каналів зв'язку. І особливо важливо це в умовах інтенсивних перешкод, зокрема застосування засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ), коли традиційні методи синхронізації та виявлення сигналів втрачають ефективність.

Стандартний метод визначення початку пакета даних, передбачений протоколом 802.11, ґрунтується на обчисленні кореляції між прийнятим сигналом та еталонною послідовністю, у результаті чого формується кореляційне плато. Цей підхід демонструє належну ефективність за звичайних умов експлуатації, коли рівень шумів є помірним, а канал зв'язку не зазнає цілеспрямованого впливу. Однак за наявності інтенсивних шумів або в умовах радіоелектронної боротьби він стає вразливим. У таких випадках кореляційне плато втрачає рівномірну структуру, стає нерівномірним, фрагментується або взагалі нівелюється, що унеможливує надійне визначення моменту початку корисного сигналу. Це, у свою чергу, призводить до зриву синхронізації, втрати пакетів і, як наслідок, порушення керованості безпілотним літальним апаратом.

Авторами запропоновано новий метод виявлення сигналів керування, позбавлений зазначених вище обмежень. Його ключова відмінність полягає у відмові від аналізу кореляційного плато на користь детектування окремих кореляційних піків. Використовуючи природну повторюваність короткої навчальної послідовності у сигналі 802.11, цей підхід забезпечує надійну ідентифікацію початку пакета навіть за умов, коли традиційне кореляційне плато зазнає значних спотворень або взагалі не формується.

Замість очікування стійкої платоподібної ділянки, яка легко руйнується під впливом перешкод, метод орієнтується на виявлення окремих пікових значень кореляційної функції, що зберігають інформативність навіть за значного погіршення співвідношення сигнал/шум.

Такий підхід забезпечує значно вищу стійкість до впливу радіоелектронних перешкод і дозволяє зберігати працездатність системи зв'язку навіть за умов значного погіршення якості прийнятого сигналу. Результати проведених експериментальних досліджень підтверджують ефективність запропонованого методу в умовах, наближених до реальних сценаріїв застосування засобів РЕБ. Отримані результати можуть бути використані при розробці сучасних систем зв'язку для безпілотних літальних апаратів, а також для модернізації вже існуючих комплексів з метою підвищення їхньої завадостійкості.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати, сигнали керування, метод, кореляційне плато, кореляційні піки, радіоелектронна боротьба, стійкість до перешкод, виявлення пакетів.

Постановка проблеми. Сучасні системи бездротового зв'язку, зокрема ті, що базуються на стандартах сімейства IEEE 802.11, широко застосовуються для керування безпілотними літальними апаратами (БПЛА). Надійність роботи таких систем значною мірою залежить від коректного та своєчасного визначення початку прийнятого пакета даних.

У більшості реалізацій первинна синхронізація приймача виконується шляхом виявлення короткої тренувальної послідовності (STS), яка має періодичну структуру. Для цього широко застосовується метод автокореляції вхідного сигналу із самим собою зі зсувом на довжину періоду L . У результаті обчислення формується характерне кореляційне плато, за довжиною якого приймається рішення про наявність пакета.

Однак у реальних умовах функціонування, особливо за наявності інтенсивних завад (наприклад, при дії систем радіоелектронної боротьби), структура прийнятого сигналу може бути частково спотворена. Це призводить до порушення кореляційного плато: воно стає нерівномірним, містить розриви або має знижену амплітуду. У таких умовах класичні методи детектування, що базуються на аналізі довжини плато, втрачають ефективність і можуть призводити до пропуску пакетів навіть за незначних пошкоджень сигналу.

Таким чином, виникає проблема підвищення завадостійкості алгоритмів визначення початку пакета в OFDM-системах. Зокрема, актуальним є розроблення методів, які б дозволяли:

- забезпечити надійне виявлення пакета за часткового спотворення тренувальної послідовності;
- зменшити ймовірність пропуску пакета в умовах зашумленого ефіру;
- зберегти працездатність алгоритму при наявності імпульсних та широкосмугових завад.

Отже, науково-практичним завданням є вдосконалення методів синхронізації приймача шляхом розроблення більш стійких підходів до аналізу тренувальних послідовностей, які враховують можливість часткового руйнування кореляційної структури сигналу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема визначення початку пакета та часової синхронізації в OFDM-системах, зокрема у стандартах сімейства IEEE 802.11, широко досліджується у сучасній науковій літературі. Основна увага приділяється розробці ефективних алгоритмів детектування сигналу та підвищенню їх завадостійкості.

У роботах, присвячених OFDM-приймачам, показано, що первинна синхронізація зазвичай виконується з використанням тренувальних послідовностей (передмови), які мають хороші автокореляційні властивості. Зокрема Гіта Прія [1], зазначає, що оцінка моменту початку символу здійснюється на основі автокореляції або крос-кореляції прийнятого сигналу з відомою еталонною послідовністю, а максимум кореляційної функції визначає точний момент синхронізації.

Класичні підходи до виявлення пакета базуються на обчисленні автокореляції сигналу зі зсувом, що відповідає довжині короткої тренувальної послідовності. Такі методи забезпечують швидке виявлення сигналу та широко застосовуються в практичних реалізаціях як зазначено у дослідженні Пей Сяо та Колін Коуен [2]. Разом із цим використовуються і методи крос-кореляції з відомою послідовністю, які дозволяють підвищити точність визначення початку символу як зазначено у дослідженні Кавіта Кхаре та співавтори [3].

У низці робіт запропоновано комбіновані підходи, що поєднують автокореляцію та оцінку потужності сигналу для підвищення ефективності детектування пакета. Наприклад, у Кю Мін Кан [4] розглядаються алгоритми, що використовують затриману кореляцію та оцінку енергії сигналу, що дозволяє покращити ймовірність виявлення у складних умовах каналу.

Також існують підходи, наприклад як у Унсун Чо та Дж. Кім [5], засновані виключно на крос-кореляції з відомою послідовністю, які забезпечують меншу апаратну складність, але є чутливими до частотних зсувів та шумів. У більш сучасних дослідженнях пропонуються методи із застосуванням алгоритмів машинного навчання для підвищення точності синхронізації наприклад у дослідженні Цін Чаоцзін та колег [6].

Незважаючи на значну кількість досліджень, існує ряд невирішених питань, які залишаються актуальними:

- більшість класичних алгоритмів орієнтовані на ідеальні або помірно зашумлені канали та демонструють суттєве погіршення ефективності при дії інтенсивних завад;
- автокореляційні методи, що формують кореляційне плато, є чутливими до локальних спотворень сигналу, що призводить до розривів плато та помилок детектування;
- крос-кореляційні методи забезпечують точніші результати, але потребують більшої обчислювальної складності або є нестійкими до частотного зсуву;

– існуючі комбіновані алгоритми не завжди забезпечують необхідну надійність у випадках часткового пошкодження тренувальної послідовності;

– недостатньо досліджені методи відновлення структури сигналу при частковій втраті кореляційних ознак.

Таким чином, актуальним залишається завдання розроблення більш завадостійких методів визначення початку пакета, які б забезпечували надійну роботу системи навіть у складних умовах радіоелектронного впливу та часткового спотворення сигналу.

Постановка завдання. Метою статті є підвищення достовірності визначення моменту початку пакета в OFDM-системах зв'язку, що використовують стандарт IEEE 802.11, за умов впливу інтенсивних завад. Для досягнення цієї мети необхідно виконати аналіз існуючих методів синхронізації, оснований на використанні короткої тренувальної послідовності, виявити їх обмеження при частковому спотворенні сигналу та запропонувати підхід, який забезпечує детектування початку пакета навіть за наявності втрат окремих ділянок сигналу.

У роботі ставиться завдання дослідити метод кореляційної обробки з використанням еталонної тренувальної послідовності, оцінити можливість відновлення відсутніх кореляційних максимумів на основі відомої структури сигналу та визначити умови підвищення завадостійкості алгоритму синхронізації.

Виклад основного матеріалу. Теоретичні основи OFDM

Ортогональне частотне мультиплексування (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing) є одним із найбільш поширених методів передавання даних у сучасних бездротових системах, зокрема в стандартах сімейства IEEE 802.11. OFDM сигнал у часовій області формується як сума гармонічних сигналів із різними частотами:

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi k \Delta f t}, \quad 0 \leq t < T \quad (1)$$

де:

X_k – комплексні символи (наприклад, QPSK/QAM),

N – кількість піднесучих,

Δf – інтервал між піднесучими,

T – тривалість OFDM символу.

У практичній реалізації формування сигналу здійснюється за допомогою оберненого швидкого перетворення Фур'є (IFFT):

$$s[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi kn/N} \quad (2)$$

Це дозволяє ефективно реалізувати OFDM у цифрових системах. Ключовою властивістю OFDM є ортогональність піднесучих. Вона забезпечується вибором частотного інтервалу:

$$\Delta f = \frac{1}{T} \quad (3)$$

Завдяки цьому виконується умова:

$$\int_0^T e^{j2\pi k \Delta f t} \cdot e^{-j2\pi m \Delta f t} dt = 0 \quad k \neq m \quad (4)$$

Це означає, що піднесучі не заважають одна одній, навіть якщо їх спектри перекриваються. Така властивість дозволяє значно підвищити спектральну ефективність системи.

Для боротьби з багатопроблемним поширенням сигналу в OFDM використовується циклічний префікс (CP, Cyclic Prefix). Він формується шляхом копіювання кінцевої частини символу на його початок (5):

$$S_{cp}(t) = S(t+T) \quad -T_{cp} \leq t < 0 \quad (5)$$

де:

$s(t)$ – Вихідний OFDM-символ,

T – тривалість символу,

T_{cp} – тривалість циклічного префікса,

$S_{cp}(t)$ – доданий циклічний префікс

Додавання циклічного префікса дозволяє по-перше зменшити міжсимвольну інтерференцію, та по-друге зберегти ортогональність піднесучих у каналі з багатопроблемністю.

У стандартах сімейства IEEE 802.11 OFDM сигнал формується з використанням 64-точкового IFFT, з яких 48 піднесучих використовуються для передачі даних, 4 для передачі пілотних сигналів, решта мають нульові значення.

Особливістю цих стандартів є наявність тренувальних послідовностей на початку пакета: коротка тренувальна послідовність (STS) та довга тренувальна послідовність (LTS).

Коротка тренувальна послідовність формується у частотній області як відома послідовність, яка після IFFT у часовій області утворює періодичний сигнал. Завдяки цьому вона складається з повторюваних фрагментів однакової довжини. Використовуючи коротку тренувальну послідовність система знаходить початок корисного сигналу.

Особливістю короткої тренувальної послідовності є те, що у часовій області вона має періодичну структуру (6):

$$S[n] \approx S[n+L] \quad (6)$$

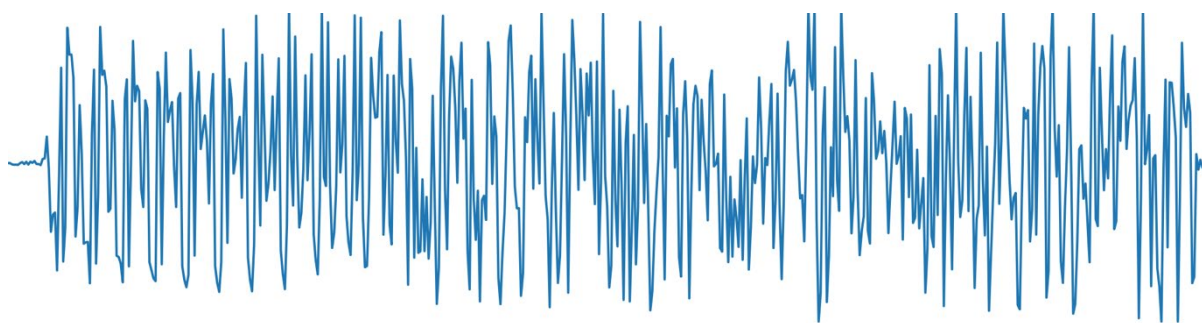


Рис. 1. Графік OFDM сигналу

де L – довжина одного періоду (для більшості варіантів стандарту $L = 16$ відліків). Приклад реального OFDM сигналу у часовій області наведено на рисунку 1.

Як ми зазначили в формулі (6) для позначення початку корисного сигналу стандарт 802.11 визначає коротку навчальну послідовність [7]. Отримана послідовність повторюється 10 разів поспіль. На рисунку 2 представлена початкова частина сигналу пакета 802.11, яка являє собою повторену 10 разів коротку навчальну послідовність.

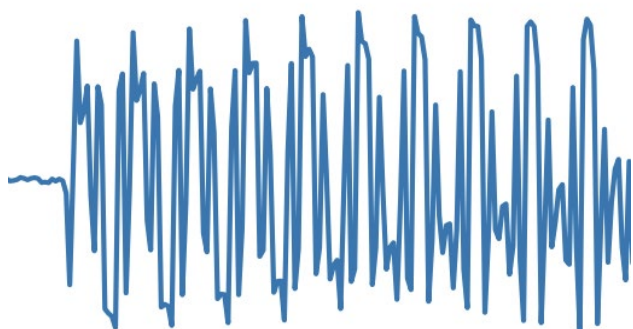


Рис. 2. Стартова послідовність сигналу

Для визначення початку корисного сигналу зазвичай на приймальній стороні виконується пошук автокореляції для вхідного сигналу, оскільки повторюється одна й та сама послідовність, що дозволяє надійно відрізнити корисний сигнал від шуму. Так для визначення автокореляції виконується обчислення (7):

$$P(n) = \sum_{k=0}^{L-1} r[n+k] \cdot \overline{r[n+k+L]} \quad (7)$$

де:

L – довжина тренувальної послідовності

r – вхідний комплексний сигнал

$\bar{r}$ – комплексно-спряжений сигнал

Довжина L короткої навчальної послідовності залежить від обраного варіанту стандарту та від частоти дискретизації, що застосовується в системі представлена у таблиці 1 [7].

Як видно з таблиці 1, тривалість одного символу змінюється пропорційно частоті дискретизації. Тому при використанні стандартної частоти дискретизації для кожного зі стандартів довжина L дорівнюватиме 16 відлікам.

Під час роботи приймального пристрою найчастіше застосовується пошук автокореляції для вхідного сигналу з цим самим сигналом із зсувом на $L = 16$ відліків.

Під час обчислення цієї кореляції за наявності корисного сигналу утворюється плато певної тривалості.

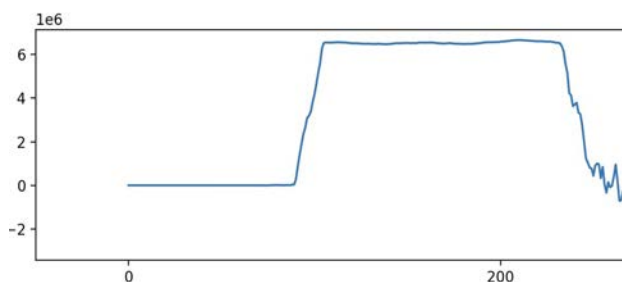


Рис. 3. Отримане значення кореляції для стартової послідовності

Таблиця 1

Параметри короткої тренувальної послідовності

Стандарт	Ширина каналу	Довжина одного STS	Частота дискретизації	Кількість STS
802.11a/h/j/n/ac/ax/b	20 МГц	0,8 мкс	20 МГц	10
802.11p	10 МГц	1,6 мкс	10 МГц	10
802.11j	5 МГц	3,2 мкс	5 МГц	10

Якщо плато перевищує по тривалості певний поріг, приймається рішення про початок корисного сигналу. Цей підхід добре працює в стандарті 802.11, однак за сильного зашумлення ефіру, наприклад, під впливом зовнішніх систем РЕБ, цей механізм визначення початку пакета за довжиною плато перестає працювати, оскільки плато може бути «пошкодженим», тобто бути неоднорідним, із розривами.

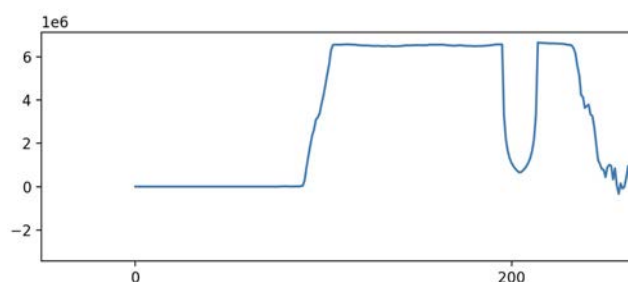


Рис. 4. Кореляційне плато з пошкодженнями

На рисунку 4 представлено плато кореляції якщо частина сигналу була пошкоджена. Так як визначення початку пакету відбувається за довжиною кореляційного плато, після обробки даних за цим методом наступний пакет буде загублено незважаючи на те що пошкоджено було не велику частину пакету

Для корекції цієї проблеми пропонується обчислювати кореляцію за окремими послідовностями, тобто отримувати не суцільне плато, яке показує високу кореляцію, а окремі кореляційні сплески, що відповідають центрам еталонної послідовності з 16 символів. Використовується кореляція з еталонним сигналом, також еталонний сигнал береться як комплексно-спряжена величина.

Отже, після обробки початкової частини вхідного сигналу з рисунка 1 ми отримуємо наступний графік кореляції між еталонною тренувальною послідовністю та сигналом з рисунка 1.

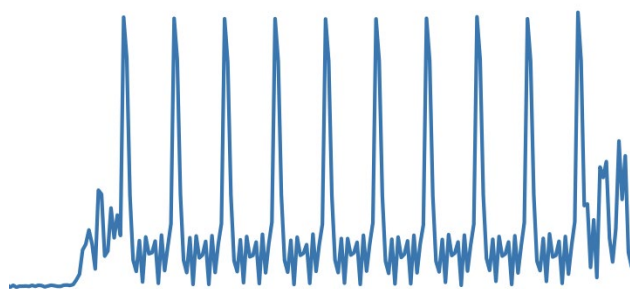


Рис. 5. Графік кореляції

За цим графіком, встановивши певне вхідне порогове значення, ми можемо отримати 10 піків кореляції. На цьому графіку всі піки наявні, однак при сильному зашумленні каналу, наприклад, при зовнішньому впливі систем РЕБ, частина піків може бути втрачена.

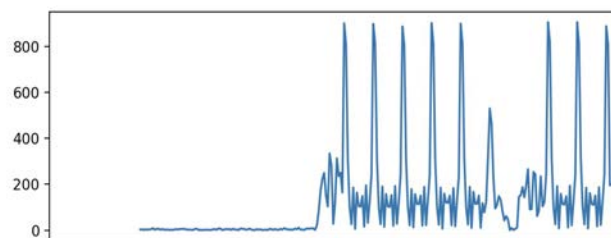


Рис. 6. Графік кореляції з пошкодженими ділянками

Проте при неповному зашумленні їх можна відновити, оскільки нам відстані між піками відомі.

За умови наявності піку в точці X та наявності піку в точці $X+2*D$, де D – відома відстань між піками, ми можемо припустити наявність піку в точці $X + D$, навіть якщо він там відсутній.

Висновки. У роботі розглянуто особливості визначення початку пакета в OFDM-системах на основі стандартів сімейства IEEE 802.11, які широко застосовуються в системах керування безпілотними літальними апаратами. Було проведено аналіз класичних методів синхронізації, які базуються на використанні короткої тренувальної послідовності та обчисленні автокореляції вхідного сигналу.

Показано, що класичний метод, який базується на пошуку кореляційного плато, демонструє ефективність у штатних умовах, проте втрачає стійкість за сильних перешкод чи часткової деградації сигналу. При цьому навіть незначні спотворення навчальної послідовності спричиняють колапс структури плато та призводять до втрати пакетів.

У роботі запропоновано підхід до визначення початку пакета, що базується на аналізі окремих кореляційних піків, які відповідають повторюваним фрагментам короткої тренувальної послідовності. На відміну від класичного методу, запропонований підхід дозволяє здійснювати детектування навіть за часткової втрати або спотворення окремих ділянок сигналу шляхом використання апріорної інформації про відстані між піками.

Показано, що у випадку втрати окремих кореляційних максимумів можливе їх відновлення на основі відомої структури сигналу, що дозволяє підвищити завадостійкість алгоритму та змен-

шити ймовірність пропуску пакета. Таким чином, запропонований метод забезпечує більш надійне визначення початку сигналу в умовах зашумленого ефіру та дії зовнішніх завад.

Отримані результати можуть бути використані при розробленні приймальних пристроїв OFDM-систем, зокрема у програмно-визначуваних радіо-

системах та FPGA-реалізаціях, з метою підвищення їх ефективності та стійкості до завад.

Перспективами подальших досліджень є кількісна оцінка ефективності запропонованого методу в різних умовах каналу, оптимізація порогових параметрів, а також апаратна реалізація алгоритму з урахуванням обмежень реального часу.

Список літератури:

1. C. Geetha Priya, Suganthi M Two symbol timing estimation methods using Barker and Kasami sequence as preamble for OFDM-based WLAN systems. *Signal Processing Volume 90, Issue 7, July 2010*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2010.01.021>
2. Pei Xiao, Colin Cowan, Ratnarajah T., Fagan T.D. Time synchronization algorithms for IEEE 802.11 OFDM systems. *Conference: Wireless Mobile and Computing (CCWMC 2009), IET International Communication Conference. 2009*. DOI: <https://doi.org/10.1049/cp.2009.1947>
3. Rakhi Thakur, Kavita Khare, Synchronization and Preamble Concept for Frame Detection in OFDM. *International Journal of Modeling and Optimization, Vol. 3, No. 1, February 2013*. DOI: <https://doi.org/10.7763/IJMO.2013.V3.237>
4. Kyu-Min Kang, Packet Detection for Zero-Padded OFDM Transmission. *IEICE Transactions on Communications, Volume E91, 2008*. DOI: <https://doi.org/10.1093/ietcom/e91-b.4.1158>
5. Unsun Cho and J. Kim, "Efficient signal acquisition scheme for multi-band OFDM UWB systems," *8th International Conference on Computing and Networking Technology (INC, ICCIS and ICMIC), Gyeongju, Korea (South), 2012*.
6. Chaojin Qing, Na Yang, Shuhai Tang, Jinliang Chen, Jiafan Wang, CNN-aided timing synchronization in OFDM systems by exploiting lightweight cascaded mode. *ICT Express, № 1, 2024*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icte.2023.03.003>
7. IEEE Std 802.11a-1999, "IEEE Standard for Information Technology–Telecommunications and Information Exchange Between Systems–Local and Metropolitan Area Networks–Specific Requirements–Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications–Amendment 1: High-speed Physical Layer in the 5 GHz band," IEEE, 1999. DOI: 10.1109/IEEESTD.1999.90606

Krivoulya G.F., Zygin S.E. DETECTION OF CONTROL SIGNALS IN UNMANNED AERIAL SYSTEMS UNDER INTENSE INTERFERENCE CONDITIONS

This work is devoted to the issue of control signal detection in communication systems of unmanned aerial vehicles (UAVs) operating in accordance with the 802.11 standard. Modern unmanned systems are increasingly used in both civil and military domains, which imposes heightened requirements on the reliability of their communication links. This is especially critical in conditions of intense interference, particularly with the use of electronic warfare (EW) measures, when traditional methods of synchronization and signal detection lose their effectiveness.

The standard method for determining the start of a data packet, as defined by the 802.11 protocol, is based on computing the correlation between the received signal and a reference sequence, resulting in the formation of a correlation plateau. This approach demonstrates adequate effectiveness under normal operating conditions, when the noise level is moderate and the communication channel is not subjected to targeted interference. However, in the presence of intense noise or under electronic warfare conditions, it becomes vulnerable. In such cases, the correlation plateau loses its uniform structure, becomes uneven, fragments, or is completely obliterated, making reliable determination of the start of the useful signal impossible. This, in turn, leads to synchronization failure, packet loss, and, consequently, loss of controllability of the unmanned aerial vehicle.

To overcome these limitations, the authors propose an alternative method for detecting control signals, which is based not on plateau analysis but on the detection of individual correlation peaks. The proposed approach leverages the repetitive nature of the short training sequence within the 802.11 signal structure and allows identification of the packet start even when the correlation plateau is distorted or absent. Instead of waiting for a stable plateau-like region, which is easily disrupted by interference, the method focuses on detecting individual peak values of the correlation function, which retain their informational value even under significant signal-to-noise ratio degradation.

This approach provides significantly higher resilience to electronic interference and allows the communication system to remain operational even under conditions of significant degradation in received signal quality. The results of experimental studies confirm the effectiveness of the proposed method under conditions approximating real-world electronic warfare scenarios. The obtained results can be used in the development of modern communication systems for unmanned aerial vehicles, as well as for the modernization of existing systems to enhance their interference immunity.

Keywords: *unmanned aerial vehicles, control signals, method, correlation plateau, correlation peaks, electronic warfare, interference resilience, packet detection.*

Дата першого надходження статті до видання: 25.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Кухта О.П.

<https://orcid.org/0009-0000-5520-2740>

Національний лісотехнічний університет України

Пірко І.Б.

<https://orcid.org/0009-0008-2378-2929>

Національний лісотехнічний університет України

МЕТОД КОВЗНОГО ГОРИЗОНТУ ТА КОРИДОРНОГО ОБМЕЖЕННЯ В ІЄРАРХІЧНИХ СЕРЕДОВИЩАХ З ДИНАМІЧНИМИ ПЕРЕШКОДАМИ

У статті розглядається актуальна науково-технічна проблема підвищення ефективності алгоритмів пошуку шляху в динамічних середовищах ігрових рушіїв реального часу. На основі аналізу існуючих рішень ієрархічної декомпозиції простору НРА* та планування траєкторій під довільним кутом Θ^* виявлено проблему високої обчислювальної складності при побудові довгих шляхів.

Запропоновано комплексний підхід до оптимізації процесу планування, що базується на поєднанні дворівневої ієрархічної структури з двома авторськими механізмами обмеження простору пошуку: методом ковзного горизонту (Rolling Horizon) та методом коридорного обмеження (Corridor Constraining). В основі архітектури лежить поділ навігаційного завдання на рівень кластерів (пошук по графу кластерів та порталів за допомогою A^*) та виконавчий рівень (побудова маршруту на клітинках за допомогою алгоритму Θ^*).

Наукова новизна дослідження полягає у впровадженні подвійного обмеження пошукового простору: за глибиною – через фокусування алгоритму на обмеженій кількості найближчих кластерів, та за шириною – шляхом відсікання вузлів-наступників, що виходять за межі сформованого навігаційного коридору від початкової точки до кінцевої. Такий підхід дозволяє перетворити радіальну хвилю розширення класичного пошуку у спрямований потік, що радикально зменшує розмір пріоритетної черги та час її сортування для алгоритмів пошуку.

Практична значущість роботи підтверджена серією експериментів у середовищі розробки Unity на картах різних розмірів (300x300 і 200x200 клітинок) з інтенсивним рухом динамічних перешкод. Отримані емпіричні дані свідчать про те, що застосування ковзного горизонту забезпечує скорочення часу обчислень на 40–60% на великих дистанціях, нівелюючи пікові затримки та роблячи навантаження на процесор передбачуваним. Доведено, що локальна адаптація траєкторії в межах обмеженого горизонту є достатньою для підтримки високої точності навігації та стійкості до колізій, що робить запропонований метод ефективним інструментом для створення високопродуктивного ігрового штучного інтелекту.

Ключові слова: пошук шляху, ієрархічне планування, Θ^* , ковзний горизонт, коридорне обмеження, динамічні перешкоди, оптимізація продуктивності.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток систем штучного інтелекту, автономної навігації робототехнічних комплексів та складних інтерактивних симуляцій у реальному часі висуває високі вимоги до алгоритмів пошуку оптимального шляху. Однією з фундаментальних проблем у цій галузі є забезпечення високої швидкодії обчислень при збереженні оптимальності траєкторії в умовах великих просторів та високої динаміки середовища.

Традиційні підходи до навігації, засновані на алгоритмах сімейства A^* та Θ^* , при безпосередньому застосуванні до великомасштабних сіток стикаються з проблемою значного зростання кількості перевірених вузлів. Це призводить до суттєвих затримок у прийнятті рішень, що є критичним для систем реального часу, таких як безпілотні літальні апарати або ігрові середовища.

Використання ієрархічної декомпозиції простору (НРА* – Near-Optimal Hierarchical

Pathfinding) дозволяє частково вирішити зазначену проблему шляхом розбиття великої карти на кластери. Проте, практична реалізація таких систем у динамічних середовищах виявляє суттєвий недолік: при появі нових перешкод або зміні параметрів прохідності (зон ризику) виникає необхідність повторного глобального перепланування від поточної позиції агента до цільової точки. Такий перерахунок може займати значний обчислювальний час, що негативно впливає на загальну продуктивність системи.

Зв'язок цієї проблеми з важливими практичними завданнями обумовлений необхідністю створення адаптивних систем навігації, які здатні швидко реагувати на зміни в оточенні, з мінімальним обчислювальним навантаженням. Вирішення задачі обмеження простору пошуку як за глибиною (часовий аспект), так і за шириною (просторовий аспект) у ієрархічних структурах є актуальним науковим напрямком, що дозволить підвищити ефективність автономних агентів у складних ієрархічних середовищах з динамічними перешкодами.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблема пошуку шляху в складних динамічних середовищах є предметом інтенсивних досліджень протягом останніх десятиліть. Фундаментальною працею у сфері ієрархічної декомпозиції простору є алгоритм Near-Optimal Hierarchical Pathfinding (HRA*), запропонований А. Ботеа. Автор довів, що розбиття графа на кластери та побудова абстрактного рівня з'єднань дозволяє на порядки скоротити кількість перевірених вузлів при незначній втраті оптимальності шляху [1, с. 12]. Подальший розвиток ієрархічних методів для двовимірних сіток, описаний Д. Харабором та А. Ботеа, підтвердив ефективність структурування мап для прискорення обчислень на великих дистанціях [5, с. 235]. Проте базові ієрархічні методи здебільшого орієнтовані на статичні середовища, де вартість переходів розраховується на етапі попередньої обробки.

Для вирішення проблеми жорсткої прив'язки до сіткової структури та отримання візуально гладких траєкторій А. Нешем було розроблено алгоритм Theta*, який реалізує перевірку прямої видимості між батьківським вузлом та наступним вузлом [2, с. 1180]. Дослідники зазначають, що такий підхід забезпечує рух під довільним кутом (Any-Angle path planning), що є критичним для реалістичної поведінки автономних агентів. Питання підвищення швидкодії таких алгоритмів на сітках детально розглянуто Т. Урасом та

С. Кенігом, які запропонували методи оптимізації геометричних перевірок для мінімізації обчислювальних витрат [6, с. 238].

У роботах, присвячених динамічним середовищам, часто розглядаються методи інкрементального оновлення шляху. С. Кеніг та М. Ліхачов обґрунтували ефективність алгоритмів швидкого перепланування в динамічних середовищах, що дозволяють локально коригувати траєкторію при зміні ваги ребер графа, уникаючи повного перерахунку [3, с. 358]. Водночас важливим аспектом залишається методологія тестування таких систем. Н. Стуртевант запропонував стандартизовані бенчмарки для сіткових алгоритмів, що дозволяє об'єктивно порівнювати продуктивність різних модифікацій пошуку на варіативних наборах даних [7, с. 145].

Концепція «ковзного горизонту» (Rolling Horizon) активно досліджується в контексті прийняття рішень в умовах невизначеності. К. Менслі та співавтори довели, що застосування обмеженої глибини пошуку дозволяє агенту приймати рішення на основі лише локально актуальної інформації, що значно прискорює час реакції системи [4, с. 105]. Системний огляд евристичних методів пошуку в реальному часі, проведений В. Булітко та Й. Бйорнссоном, вказує на те, що обмеження часових витрат на кожен крок планування є ключовим для ігрових рушіїв та робототехніки [8, с. 5].

Невирішеною частиною загальної проблеми, яку досліджують у цій статті, є відсутність цілісного механізму, що поєднував би ієрархічну структуру з подвійним обмеженням пошукового простору: за глибиною (ковзний горизонт) та за шириною (коридорне обмеження). Більшість сучасних систем продовжують будувати глобальні плани або виконувати детальний пошук у широкому радіусі навіть тоді, коли агент потребує лише короткострокової стратегії руху для адаптації до динамічних перешкод у межах вузького навігаційного коридору.

Постановка завдання. Метою цієї статті є розробка та експериментальна перевірка комбінованого методу ієрархічного пошуку шляху, спрямованого на мінімізацію обчислювальних витрат в динамічних середовищах шляхом одночасного застосування механізмів ковзного горизонту та коридорного обмеження на рівні кластерів. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Інтегрувати запропонований метод у навігаційну систему на базі алгоритму Theta* для забезпечення гладкості траєкторій агентів.

2. Провести порівняльний аналіз швидкодії (часу пошуку), стабільності (кількості зіткнень) та частоти перепланування розробленого методу порівняно з класичним ієрархічним підходом на великомасштабних картах (300х300 і 200х200 клітинок) з різною щільністю динамічних перешкод.

3. Обґрунтувати ефективність запропонованої оптимізації на основі отриманих експериментальних даних з метою застосування у ігрових системах та симуляторах реального часу.

Виклад основного матеріалу. Запропонований метод базується на концепції декомпозиції складного навігаційного завдання на два рівні, що дозволяє знизити обчислювальну складність алгоритму на великих графах. Перший рівень – рівень кластерів – оперує структурованими кластерами та порталами, формуючи глобальний стратегічний план. Другий – виконавчий рівень – здійснює детальне планування в межах обмеженого динамічного вікна. Така архітектура дає змогу зменшити кількість ітерацій відкритого списку, яка в класичному алгоритмі A^* зростає нелінійно зі збільшенням відстані до цілі.

Фундаментом системи є ієрархічне розбиття робочого простору на кластери. Кожен кластер являє собою ізольовану область сітки, що охоплює фіксовану кількість клітинок (у цій роботі – 15×15) і взаємодіє з сусідніми кластерами лише через вузькі зони переходу – портали. Це дозволяє трансформувати задачу пошуку шляху з перевірки великої кількості окремих клітинок у пошук на графі кластерів, де вартість переходу між вузлами визначається не лише евклідовою відстанню, а й динамічно оновлюваною оцінкою прохідності.

Низькорівневий пошук шляху реалізовано на базі алгоритму Θ^* , що забезпечує перехід від дискретної сіткової моделі до планування траєкторій під довільними кутами. На відміну від класичного A^* , який обмежує рух сусідніми вузлами сітки, Θ^* реалізує перевірку прямої видимості на етапі релаксації ребер. За відсутності перешкод між батьківським вузлом поточного стану та потенційним наступним вузлом встановлюється прямий зв'язок із пропуском проміжних клітинок. Це дозволяє формувати візуально гладкі та фізично обґрунтовані траєкторії, позбавлені характерних для сіткових методів зигзагоподібних відхилень.

Основна оптимізація запропонованого методу полягає в інтеграції механізму ковзного горизонту. Замість повного планування маршруту до цільової точки, що є малоефективним у динамічному середовищі (де конфігурація перешкод

може змінитися до моменту досягнення цілі), алгоритм фокусується лише на найближчих N кластерах високорівневого плану. При кожному переміщенні агента або зміні умов середовища «горизонт» зміщується, ініціюючи локальне перепланування. Це забезпечує високу частоту оновлення траєкторії без надмірного обчислювального навантаження, оскільки складність обмежується величиною горизонту і не залежить від загальної довжини маршруту.

Ключова технічна перевага методу, що становить другу складову оптимізації, полягає у впровадженні коридорного обмеження. На етапі деталізації низькорівневий алгоритм отримує чіткі просторові обмеження, визначені парою послідовних кластерів, обраних із високорівневого плану. Під час ітерацій пошуку всі вузли-сусіди, що виходять за межі цих кластерів, відсікаються на етапі генерації наступників. Це трансформує стандартний радіальний процес розширення A^* у спрямований пошук у межах обмеженого «коридору». У результаті розмір відкритого списку суттєво зменшується, а операції додавання та впорядкування в пріоритетній черзі виконуються за логарифмічний час відносно невеликої кількості вузлів, що підвищує загальну продуктивність системи.

Для оцінювання ефективності запропонованих механізмів оптимізації – ковзного горизонту та коридорного обмеження – проведено серію експериментів у шести різних середовищах із варіативною розмірністю сітки та складністю маршрутів. Тестування охоплювало мапи розміром 300×300 та 200×200 клітинок із довжиною маршрутів 200 і 320 клітинок. В усіх сценаріях застосовувалося динамічне зважування вартості кластерів, що дозволяло алгоритму враховувати щільність перешкод у реальному часі.

Таблиця 1
Порівняльна таблиця результатів тестування

Середовище	Розмір мапи/Дистанція	Використання оптимізації	Середній час пошуку (ms)
1	300х300 / 320	Ні	44.47
		Так	28.67
2	300х300 / 320	Ні	57.5
		Так	28.03
3	300х300 / 320	Ні	38.5
		Так	23.59
4	200х200 / 200	Ні	26.13
		Так	16.53
5	200х200 / 200	Ні	22.78
		Так	17.91
6	200х200 / 200	Ні	15.8
		Так	14.69

Отримані результати демонструють чітку залежність між застосуванням запропонованих методів та стабільністю обчислювальних витрат системи. Основним показником ефективності виступає загальний час обчислення шляху. Аналіз даних виявив стабільну перевагу методу з використанням ковзного горизонту та коридорного обмеження, особливо на великих дистанціях.

У середовищах розміром 300×300 середній час обчислення без оптимізації становив 45–50 мс, досягаючи пікових значень до 80,65 мс, що є критичним для систем реального часу. Натомість застосування оптимізації дозволило знизити середній показник до 25–28 мс. Це свідчить про те, що обчислювальна складність у межах запропонованого підходу визначається переважно розміром вікна планування, а не загальною довжиною маршруту, що забезпечує майже двократне прискорення на складних ділянках.

Важливим аспектом є стабільність часу виконання. Використання ковзного горизонту суттєво зменшує варіативність обчислювальних витрат. Зокрема, у другому тестовому середовищі різниця між максимальним і мінімальним часом обчислення при повному пошуку становила 37 мс, тоді як після впровадження оптимізації це відхилення скоротилося до 6,7 мс. Зменшення пікових затримок є критичним для забезпечення стабільності роботи систем реального часу, оскільки дозволяє уникнути різких просідань продуктивності під час інтенсивних запитів на пошук шляху.

Поведінка алгоритму в динамічному середовищі оцінювалася за показниками кількості колізій та частоти перепланування. Кількість викликів процедури перепланування при використанні ковзного горизонту залишалася на рівні, порівнянному з повним пошуком, а в окремих сценаріях демонструвала тенденцію до зниження. Це свідчить про те, що локальна деталізація траєкторії в межах обмеженого горизонту є достатньою для прийняття коректних навігаційних рішень.

При зменшенні масштабу карти до 200×200 клітинок перевага в часі стає менш вираженою в абсолютних значеннях, проте відносно покращення продуктивності залишається суттєвим. Це підкреслює універсальність коридорного обмеження, яке ефективно зменшує кількість ітерацій відкритого списку навіть за помірної кількості вузлів у системі. Отримані результати підтверджують, що поєднання механізмів ковзного горизонту та коридорного обмеження дозволяє скоротити час обчислень на 40–60% на великих

дистанціях, одночасно забезпечуючи передбачуваність обчислювального навантаження та зберігаючи високу точність навігації в умовах динамічних перешкод.

Висновки. Розроблена та протестована система ієрархічного пошуку шляху з використанням алгоритму Theta*, доповнена авторськими методами ковзного горизонту та коридорного обмеження, демонструє значну перевагу над класичними підходами в умовах динамічних ігрових середовищ. Проведене дослідження підтверджує, що декомпозиція навігаційного завдання на глобальний стратегічний план та локальну детальну траєкторію дозволяє ефективно масштабувати ігрові світи без пропорційного зростання обчислювальних витрат.

Впровадження методу ковзного горизонту вирішило проблему надлишкових обчислень на великих дистанціях. Емпіричні дані свідчать про те, що обмеження вікна деталізації шляху N кластерами дозволяє утримувати час обчислення в межах передбачуваної константи, що критично важливо для стабільної частоти кадрів в реальному часі. Отримане прискорення у два рази на великомасштабних мапах (300×300 клітинок) доводить, що локальна адаптація траєкторії є не лише продуктивнішою, а й достатньою для коректної навігації агента в умовах постійних змін середовища.

Ефективність коридорного обмеження проявилася у радикальному скороченні простору пошуку для алгоритму Theta*. Шляхом жорсткого відсікання вузлів, що не входять до поточного навігаційного коридору, вдалося мінімізувати розмір пріоритетної черги та час її сортування. Це дозволило використовувати переваги планування траєкторій під довільним кутом без характерних для нього високих витрат на перевірку прямої видимості, забезпечуючи при цьому візуально природний та плавний рух агентів.

Практична значущість роботи полягає у створенні надійного інструментарію для розробки складних ігрових систем у Unity, де одночасно діє велика кількість динамічних об'єктів. Запропонована архітектура гарантує передбачуване навантаження на CPU та високу частоту оновлення шляхів, що є фундаментом для створення якісного ігрового штучного інтелекту. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на адаптивне налаштування розміру горизонту залежно від поточної швидкості агента або щільності динамічних перешкод у конкретних зонах карти.

Список літератури:

1. Botea A., Müller M., Schaeffer J. Near-optimal hierarchical path-finding. *Journal of Game Development*. 2004. Vol. 1, No. 1. P. 7–28.
2. Nash A., Daniel K., Koenig S., Felner A. Theta*: Any-angle path planning on grids. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2007. Vol. 21, No. 1. P. 1177–1183. <https://doi.org/10.1613/jair.2994>
3. Koenig S., Likhachev M. Fast replanning for navigation in unknown terrain. *IEEE Transactions on Robotics*. 2005. Vol. 21, No. 3. P. 354–365. <https://doi.org/10.1109/TRO.2004.838026>
4. Mansley C. R., Kochenderfer M. J., Wheeler T. A. Rolling horizon decision making in uncertainty. *Journal of Aerospace Information Systems*. 2011. Vol. 8, No. 5. P. 101–118.
5. Harabor D., Botea A. Hierarchical pathfinding for 2D grid maps. *Proceedings of the 23rd AI Conference on Advances in Artificial Intelligence*. 2010. P. 232–241.
6. Uras T., Koenig S. Speeding up any-angle path planning on grids. *Proceedings of the International Conference on Automated Planning and Scheduling*. 2015. Vol. 25. P. 234–242. <https://doi.org/10.1609/icaps.v25i1.13724>
7. Sturtevant N. R. Benchmarks for grid-based pathfinding. *Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*. 2012. Vol. 4, No. 2. P. 144–148. <https://doi.org/10.1109/TCIAIG.2012.2197681>
8. Bulitko V., Björnsson Y. Real-time heuristic search: A survey. *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*. 2014. Vol. 6, No. 1. P. 1–17. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8188-2_1

Kukhta O.P., Pirko I.B. ROLLING HORIZON AND CORRIDOR CONSTRAINING METHOD IN HIERARCHICAL ENVIRONMENTS WITH DYNAMIC OBSTACLES

The paper addresses a relevant scientific and technical problem of improving the efficiency of pathfinding algorithms in dynamic environments within real-time game engines. Based on the analysis of existing solutions for hierarchical space decomposition (HPA) and any-angle path planning (Theta*), the issue of high computational complexity when constructing long paths has been identified.*

A comprehensive approach to planning process optimization is proposed, based on a combination of a two-level hierarchical structure with two original search space limitation mechanisms: the Rolling Horizon method and the Corridor Constraining method. The architecture is based on dividing the navigation task into a cluster level (searching the cluster and portal graph using A) and an executive level (constructing the route on cells using the Theta* algorithm).*

The scientific novelty of the study lies in the implementation of a dual search space limitation: in depth – by focusing the algorithm on a limited number of the nearest clusters, and in width – by pruning successor nodes that fall outside the formed navigation corridor from the start point to the end. This approach allows transforming the radial expansion wave of classical search into a directed flow, which radically reduces the size of the priority queue and its sorting time for search algorithms.

The practical significance of the work is confirmed by a series of experiments in the Unity development environment on maps of various sizes (300x300 and 200x200 cells) with intensive movement of dynamic obstacles. The obtained empirical data indicate that the application of a rolling horizon provides a reduction in calculation time by 40–60% over long distances, eliminating peak delays and making the CPU load predictable. It is proved that local trajectory adaptation within a limited horizon is sufficient to maintain high navigation accuracy and collision resistance, making the proposed method an effective tool for creating high-performance game artificial intelligence.

Keywords: pathfinding, hierarchical planning, Theta*, rolling horizon, corridor constraining, dynamic obstacles, performance optimization.

Дата першого надходження статті до видання: 13.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 14.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

УДК 681.518:621.313:681.7.068
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.1/18>

Лисенко О.І.

<https://orcid.org/0000-0002-7276-9279>
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Тачиніна О.М.

<https://orcid.org/0000-0001-7081-0576>
Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Чумаченко С.М.

<https://orcid.org/0000-0002-8894-4262>
Державний науково-дослідний інститут авіації
Міністерства оборони України

Кисельов В.Б.

<https://orcid.org/0000-0003-3437-2825>
Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського

Гуйда О.Г.

<https://orcid.org/0000-0002-2019-2615>
Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського

Омецинська Н.В.

<https://orcid.org/0000-0002-8938-7189>
Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського

КАСКАДНА SISO LTI СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ВУЗЛА РУХОМОСТІ ВІЙСЬКОВОГО ГУМАНОЇДНОГО РОБОТА

У статті досліджується можливість застосування узагальненого інтегро-диференціюючого регулятора (УІД-регулятора) як ефективної альтернативи традиційному ПІД-регулятору в каскадних SISO LTI системах автоматичного керування мехатронними пристроями вузлів рухомості гуманоїдних роботів. Обґрунтовано доцільність використання саме каскадних (двоконтурних) систем, які забезпечують покращені показники якості керування, зокрема зменшення впливу зовнішніх і параметричних збурень, скорочення тривалості перехідних процесів та підвищення точності відтворення заданих рухів. Показано, що відмова від внутрішнього контуру призводить до погіршення динамічних характеристик системи, що є критичним для задач забезпечення плавності та безпечності рухів гуманоїдних роботів.

Розглянуто проблему складності параметричного налаштування великої кількості ПІД-регуляторів у багатоконтурних системах, характерних для сучасних робототехнічних комплексів, де кількість контурів може досягати тисяч. Встановлено, що класичні методи налаштування (Зіглера–Нікольса, Коена–Куна) потребують значних часових витрат, причому основна їх частина припадає на етап дооптимізації параметрів із використанням комп'ютерного моделювання.

Запропоновано використання УІД-регулятора, який реалізується у вигляді узагальненого інтегро-диференціюючого контуру або послідовного з'єднання ідеального інтегратора з компенсаторами упередження–затримки. Розроблено метод експрес-налаштування УІД-регулятора (МЕН УІДР), що дозволяє на основі відомої математичної моделі об'єкта керування отримати раціональні параметри регулятора вже на етапі первинного налаштування без необхідності подальшої оптимізації. Описано

основні етапи методу, включаючи формування розімкненого контуру, вибір структурних параметрів, визначення частоти зрізу та обчислення параметрів регулятора.

Наведено результати комп'ютерного моделювання, які демонструють, що застосування УІД-регулятора забезпечує покращення показників якості перехідних процесів, зокрема зменшення коливальності, відсутність перерегулювання та підвищення плавності рухів у порівнянні з ПІД-регуляторами. Доведено, що у ряді випадків достатньо використання лише одного УІД-регулятора у внутрішньому контурі для досягнення прийнятних характеристик системи. Запропонований підхід забезпечує суттєве скорочення часу налаштування, простоту реалізації та підвищення ефективності керування, що підтверджує перспективність використання УІД-регуляторів у системах керування гуманоїдними роботами з підвищеними вимогами до людиноподібності рухів.

Ключові слова: Система автоматичного керування, SISO LTI система, УІД-регулятор, ПІД-регулятор, інтегро-диференціюючий контур, компенсатор упередження-затримки, мехатронні системи, гуманоїдні роботи, вузли рухомості.

Постановка проблеми. Двокаскадні системи керування (рис.1) мають кращі показники якості керування порівняно із однокаскадними системами [8]. Тому їх потрібно використовувати там, де їх ще немає. Якщо відмовитися від двокаскадності керування в тих вузлах рухомості, де вона є, для того щоб зменшити кількість регуляторів, які підлягають налаштуванню, то будуть втрачені наступні позитивні властивості каскадного керування:

1. Зовнішні збурення, що діють на частину об'єкта керування, яка охоплена місцевим зворотнім зв'язком, будуть напряму впливати на вихідну координату, а не зменшуватимуться у внутрішньому допоміжному контурі.

2. Параметричні збурення, які виникають у внутрішньому контурі будуть суттєво впливати на вихідний сигнал.

3. Значно збільшиться час перехідного процесу на виході системи, якщо буде відключено внутрішній зворотній зв'язок, завдяки якому відбувається корекція динамічних властивостей мехатронних пристроїв вузла рухомості.

В теперішній час у мехатронних пристроях вузлів рухомості гуманоїдних роботів використовуються (практично у 100 %) в якості регуляторів в обох каскадах ПІД – регулятори [8-12]. Як відомо, ПІД – регулятор формує свій вихідний

сигнал, як суму пропорційного, інтегрального та диференціального сигналів від помилки, що подається на його вхід. Для відображення математичної моделі алгоритму роботи ПІД – регулятора скористаємося так званою стандартною формою

$$W_{pidj}(s) = k_{pj} \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{ij} \cdot s} + \frac{T_{dj} \cdot s}{\tau_{dj} \cdot s + 1} \right),$$

де (згідно рекомендацій [8]) приймемо, що додаткова стала часу може бути обчислена із наступного співвідношення $\tau_{dj} = 0.15 \cdot T_{ij} (j=1,2)$.

Припустимо, що відома математична модель об'єктам керування $W_{oj}(s) (j=1,2)$. В якості регулятора в обох каскадах планується використання ПІД – регулятора, тобто структура регулятора є відомою: $W_{Rj}(s) = W_{pidj}(s) (j=1,2)$. За звичай, для такого налаштування параметрів обох ПІД – регуляторів, при якому в системі автоматичного керування реалізується плавність (людиноподібність) рухів використовується двоетапна процедура: на першому етапі виконують первинне налаштування методами Зіглера-Нікольса або Коена-Куна; на другому етапі методом комп'ютерного моделювання покращують результат первинного налаштування. Тривалість та результативність другого етапу суттєво залежить від первинного налаштування. Досвід налаштування ПІД – регулятора в цілому показує, що 90% часу (і при цьому не

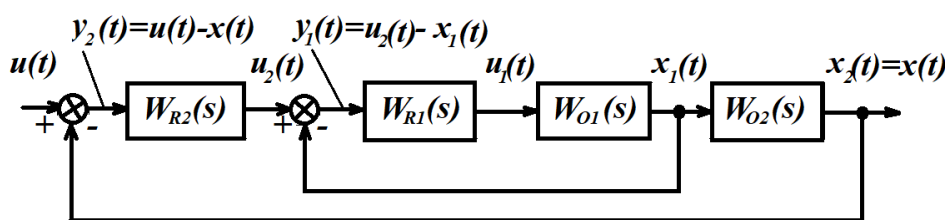


Рис. 1. Структурна схема каскадної (багатоконтурної) SISO LTI системи автоматичного керування мехатронними пристроями в вузлах рухомості гуманоїдних роботів: $W_{Rj}(s), W_{Oj}(s) (j=1,2)$ – скалярні неперервні передавальні функції, які відображають алгоритм роботи регулятора (індекс Rj) та математичну модель об'єкта керування (індекс Oj), що відносяться відповідно до першого каскаду (внутрішнього контуру, $j=1$) та другого каскаду (зовнішнього контуру, $j=2$) системи автоматичного керування

завжди із бажаним результатом) витрачається на другий етап налаштування [8-12].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При побудові гуманоїдних роботів, що призначені для роботи поруч із людьми (домашні роботи, роботи медичні-сестри, обслуговуючі роботи в місцях обслуговування клієнтів) однією із головних вимог є реалізація принципу безпечної взаємодії гуманоїдних роботів і людей [1-6]. Цей принцип реалізується завдяки підходу, який можна назвати «плавність + чуттєвість» («П + Ч»): виконання роботами рухів, які нагадують (практично не відрізняються) рухи людини, тобто є плавними і чуттєвими у силовому відношенні [5-7].

Структура каскадних (багатоконтурних) SISO LTI систем автоматичного керування із властивостями квазіінваріантності (квазіадаптивності) до дії зовнішніх збурень найкращим чином забезпечує реалізацію підходу «П + Ч» [8-11] (див. рис.1).

Зазвичай, в кожному із каскадів використовують регулятори із параметричним налаштуванням із структурою різновидів ПД – регулятора (від пропорційного регулятора до повної структури із пропорційним, інтегральним та диференціальним сигналами) [12, 13].

Наявність інтегруючої ланки забезпечує властивість квазіінваріантності до зовнішніх збурень типу східчаста дія [8].

Враховуючи той факт, що у гуманоїдних роботів кількість вузлів рухомості перевищує сотні [6, 7, 9], а в каскадних системах автоматичного керування приводами у вузлах рухомості, як мінімум, використовується два каскади, то загальна кількість регуляторів, які потрібно налаштовувати, може перевищувати тисячі. Зрозуміло, що постає актуальна інженерна проблема щодо швидкого налаштування (або переналаштування) регуляторів. Підкреслимо, що, якщо для параметричного налаштування використовуються комп'ютерні програми чисельного налаштування за алгоритмічно заданими критеріями, то актуальна задача швидкого налаштування регулятора перетворюється у актуальну задачу пошуку першого вдалого наближення, тобто пошуку початкових умов, з яких «стартують» комп'ютерні алгоритми налаштування [12, 14].

Постановка завдання. Постає науково-технічна задача: скоротити час, який витрачається на таке налаштування каскадної системи автоматичного керування мехатронними пристроями у вузлах рухомості, при якому забезпечується плавність рухів гуманоїдного робота, тобто відбувається досягнення практично людиноподібних рухів.

Інженерний досвід розв'язання задач налаштування структури та параметрів регуляторів вказує на два ефективні підходи: по-перше, забезпечити вдале перше наближення до прийнятних структури та параметрів регулятора (первинне налаштування); по-друге, після першого наближення виконувати доналаштування мінімальної кількості параметрів.

Виклад основного матеріалу.

Метод експрес-налаштування узагальненого інтегро – диференціюючого регулятора (МЕН УІД – регулятора)

Вихідними даними для розв'язання поставленої науково-технічної задачі є: структура каскадної SISO LTI системи автоматичного керування (САК) (рис. 1) та математична модель об'єкта керування $W_{oj}(s)$ ($j=1,2$).

В якості САК – прототипу, яку бажано покращити завдяки використанню УІД – регулятора, розглядається САК із ПД – регуляторами. ПД – регулятори підключені відповідно у внутрішній та зовнішній каскади (рис. 1).

Задача синтезу каскадної САК (рис.1) вважається розв'язаною, якщо синтезовано алгоритми роботи регуляторів у вигляді їх передавальних функцій $W_{Rj}(s)$ ($j=1,2$).

Загальний підхід до синтезу передавальних функцій регуляторів $W_{Rj}(s)$ ($j=1,2$) полягає в наступному. Спочатку відбувається синтез регулятора для внутрішнього каскаду (контуру) із математичною моделлю алгоритму його роботи, який задається передавальною функцією $W_{R1}(s)$, де в якості математичної моделі об'єкта керування розглядається $W_{o1}(s)$ (рис.1). Після цього виконується синтез регулятора зовнішнього каскаду (контуру), тобто знаходиться передавальна функція $W_{R2}(s)$. В якості математичної моделі об'єкта керування розглядається послідовне з'єднання передавальних функцій внутрішнього каскаду (контуру) та $W_{o2}(s)$.

Для розв'язання поставленої вище науково-технічної задачі пропонується замінити ПД – регулятори в каскадній системі – прототипі узагальненими інтегро-диференціюючими регуляторами (УІД – регуляторами), для первинного налаштування яких використати спеціальний метод первинного експрес-налаштування із підвищеною якістю налаштування.

Зміст основного матеріалу: структура та параметри УІД – регулятора; метод експрес-налаштування УІД – регулятора; приклад первинного налаштування ПД та УІД – регуляторів для каскадної САК та порівняльне моделювання перехід-

них процесів у каскадній САК із синтезованими регуляторами.

Структура та параметри УІД – регулятора.

В якості альтернативи алгоритму ПІД – регулятора пропонується застосувати алгоритм, який задається передавальною функцією УІД – регулятора:

$$W_{UD}(s) = \frac{k_{UD}}{s^v} \cdot \frac{(T_1 s + 1)^{m_1} \cdot (T_3 s + 1)^{m_3}}{(T_2 s + 1)^{m_2} \cdot (T_4 s + 1)^{m_4}},$$

параметричний синтез якого (пошук параметрів $k_{UD} > 0; v, m_{1,2,3,4} \in \{0; 1; 2; \dots\}; T_{1,2,3,4} > 0$) пропонується виконати методом експрес-налаштування УІД – регулятора (МЕН УІД – регулятора). Ще раз підкреслимо, що МЕН УІД – регулятора розглядається як метод первинного параметричного налаштування регулятора.

Нагадаємо, що згідно термінології, яка використовується у національній або англійській науковій літературі, УІД – регулятор ще називають відповідно узагальненим інтегро-диференціюючим контуром або з'єднанням ідеального інтегратора із узагальненими компенсаторами упередження – затримки.

Етапи МЕН УІД – регулятора:

Етап 1. Побудувати математичну модель розімкненого контуру.

Розглянути розімкнений контур у вигляді послідовного з'єднання математичних моделей УІД – регулятора і об'єкта керування та обчислити передавальну функцію розімкненого контуру:

$$\begin{aligned} W_d(s) &= W_{UD}(s) \cdot W_o(s) = \\ &= k_{UD} \cdot \frac{(T_1 s + 1)^{m_1} \cdot (T_3 s + 1)^{m_3}}{(T_2 s + 1)^{m_2} \cdot (T_4 s + 1)^{m_4}} \cdot \frac{1}{s^v} W_o(s) = \\ &= W_{UD}^*(s) \cdot W_o^*(s), \end{aligned}$$

$$\text{де } W_{UD}^*(s) = k_{UD} \cdot \frac{(T_1 s + 1)^{m_1} \cdot (T_3 s + 1)^{m_3}}{(T_2 s + 1)^{m_2} \cdot (T_4 s + 1)^{m_4}};$$

$$W_o^*(s) = \frac{1}{s^v} W_o(s);$$

$W_o(s) = \frac{1}{s^l} \cdot \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}$ – передавальна функція об'єкта керування. Нагадаємо, що вважаються відомими: l – кількість ідеальних інтеграторів у складі математичної моделі ОК; m та n – порядки поліномів чисельника і знаменника $W_o(s)$ та коефіцієнти цих поліномів при відповідних степенях s .

Етап 2. Задати структурні параметри передавальної функції $W_{UD}(s)$ УІД – регулятора v та $m_{1,2,3,4}$.

За звичай v та $m_{1,2,3,4} \in \{0; 1; 2\}$.

Обираємо v (v – кількість ідеальних інтеграторів у складі регулятора)

на виконання вимоги щодо забезпечення заданого порядку астатизму замкненого контуру (рис. 1) із врахуванням кількості ідеальних інтеграторів у складі об'єкта керування.

Обираємо $m_{1,2,3,4}$ із врахуванням властивостей компенсаторів упередження-затримки (КУЗ)

$$W_{12}(s) = \frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1} \text{ та } W_{34}(s) = \frac{T_3 s + 1}{T_4 s + 1}.$$

Аналіз амплітудних та фазових частотних характеристик компенсаторів упередження-затримки дозволяє зробити наступні висновки:

1. КУЗ із властивостями ланки упередження дозволяє збільшити запас за фазою.
2. КУЗ із властивостями ланки затримки дозволяє зменшити вплив високочастотних збурень.
3. Послідовне включення ланок упередження та затримки із піднесенням біномів до відповідного степеню $m_{1,2,3,4}$ дозволяє отримати та підсилити обидва позитивні ефекти.

Етап 3. Обчислити частоту зрізу ω_z для передавальної функції $W_o^*(s)$, тобто частоту, на якій $|W_o^*(j \cdot \omega_z)| = 1$.

Для побудови передавальної функції

$$W_o^*(s) = \frac{1}{s^{v+l}} \cdot \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}$$

та обчислення частоти зрізу можна скористатися відповідними функціями системи комп'ютерної математики MATLAB+Simulink.

Етап 4. Обчислення параметрів УІД – регулятора.

За відомою частотою зрізу ω_z обчислити параметри передавальної функції УІД – регулятора:

$$T_1 = \frac{3.3}{\omega_z}; T_3 = \frac{1}{3.3 \cdot \omega_z}; T_2 = \frac{1}{33 \cdot \omega_z}; T_4 = \frac{1}{330 \cdot \omega_z}.$$

Записані співвідношення дозволяють отримати вдале перше наближення до прийнятних значень параметрів УІД – регулятора при будь-яких значеннях його структурних параметрів v та $m_{1,2,3,4}$. Ці співвідношення отримані в результаті емпіричного узагальнення досвіду синтезу УІД – регуляторів.

Етап 5. Підбір структурних параметрів $m_{1,2,3,4}$ та коефіцієнта підсилення регулятора k_{UD} .

Перший крок: задати $m_{1,2,3,4} = 1$.

Побудувати комп'ютерну математичну модель та виконати імітаційний експеримент для підбору k_{UD} . Рекомендується: розпочати із значення

$k_{UD} \in [0.1 \cdot k_{PKZ-N}; 0.5 \cdot k_{PKZ-N}]$, де k_{PKZ-N} – коефіцієнт підсилення, який обчислено за методом коли-

вань Зіглера – Нікольса [8], і підібрати таке значення k_{UD} , при якому час тривалості перехідного процесу, коливальність та перерегулювання матимуть прийнятні для конкретної задачі значення.

Якщо вдалося підібрати k_{UD} , при якому вище означені параметри перехідного процесу задовольняють вимогам конкретної задачі, то вважаємо, що етап 5 завершено.

Якщо не вдалося задовольнити вимогам конкретної задачі, то змінюємо один із структурних параметрів $m_{1,2,3,4}$ і повторюємо підбір k_{UD} .

При первинному налаштуванні етап 5 виконується в інтерактивному режимі «в ручну». Досвід показує, що достатньо не більше декількох «запусків» комп'ютерної математичної моделі для отримання прийнятного для практичного використання результату, тобто, до припинення налаштування в цілому. Підкреслимо, що «людноподібність» рухів оцінюють експерти, хоча формально плавність рухів можна задавати із використанням відомих стандартних форм [12].

Приклад первинного налаштування ПД та УД – регуляторів для каскадної САК та порівняльне моделювання перехідних процесів у каскадній САК із синтезованими регуляторами.

Розглянемо приклад первинного налаштування ПД – та УД – регуляторів для каскадної САК (рис. 1) та виконаємо порівняльне моделювання перехідних процесів у каскадній САК із синтезованими регуляторами.

Почнемо із первинного налаштування ПД – регуляторів для каскадної САК (рис. 1).

Для первинного налаштування параметрів ПД – регулятора (тобто, визначення коефіцієнта підсилення k_p , сталої інтегрування T_i та сталої диференціювання T_d) будемо використовувати добре відомі методи [8]: коливаний Зіглера – Нікольса (KZ-N); Зіглера – Нікольса при використанні перехідного процесу (Z-NPP); Коена – Куна при використанні перехідного процесу (K-KPP). Для демонстрації того, яким саме методом було визначено параметри ПД – регулятора будемо використовувати для кожного із методів відповідні індекси: $k_{pKZ-N}, T_{iKZ-N}, T_{dKZ-N}$; $k_{pZ-NPP}, T_{iZ-NPP}, T_{dZ-NPP}$; $k_{pK-KPP}, T_{iK-KPP}, T_{dK-KPP}$.

Наведені вище методи вимагають проведення комп'ютерного або натурного експериментів [8-12]. За результатами експерименту визначаються допоміжні параметри, які будемо позначати $K_0, P_0; x_0(t_0), x_{0\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} x_0(t), t_0, t_1, t_2$. Фізичний та математичний зміст цих параметрів ілюструється за допомогою рис. 2 та 3.

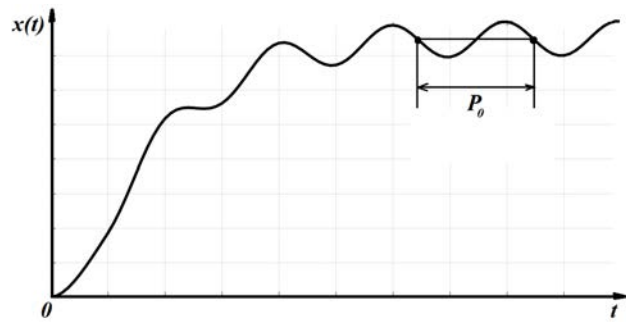


Рис. 2. Перехідний процес зі сталими коливаннями із періодом P_0 на виході замкненої системи, яка складається із пропорційного регулятора із коефіцієнтом підсилення K_0 та об'єкта керування: значення K_0, P_0 використовуються для обчислення параметрів (первинного налаштування) ПД – регулятора методом коливаний Зіглера – Нікольса

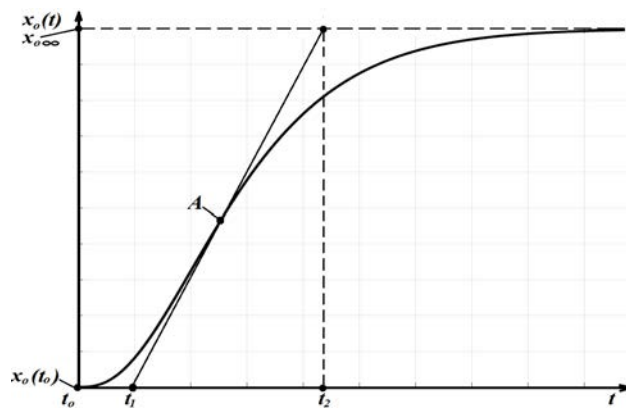


Рис. 3. Перехідний процес на виході об'єкта керування: значення $x_0(t_0), x_{0\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} x_0(t), t_0, t_1, t_2$ використовуються для обчислення параметрів (первинного налаштування) ПД – регулятора методами Зіглера – Нікольса та Коена – Куна при використанні перехідного процесу (в точці A (точка перегину перехідного процесу) проведена дотична)

За відомими K_0, P_0 та $x_0(t_0), x_{0\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} x_0(t), t_0, t_1, t_2$ виконується обчислення параметрів ПД – регулятора із використанням вище означених методів [8]:

$$k_{pKZ-N} = 0.6 \cdot K_0, T_{iKZ-N} = 0.5 \cdot P_0, T_{dKZ-N} = \frac{P_0}{8};$$

$$k_{pZ-NPP} = 1.2 \cdot \frac{D_2}{D_0 \cdot D_1}, T_{iZ-NPP} = 2 \cdot D_1, T_{dZ-NPP} = 0.5 \cdot D_1;$$

$$k_{pK-KPP} = \frac{D_2}{D_0 \cdot D_1} \cdot \left(0.9 + \frac{D_1}{12 \cdot D_2} \right),$$

$$T_{iK-KPP} = D_1 \cdot \frac{30 \cdot D_2 + 3 \cdot D_1}{9 \cdot D_2 + 20 \cdot D_1},$$

$$T_{dK-KPP} = \frac{4 \cdot D_1 \cdot D_2}{11 \cdot D_2 + 0.2 \cdot D_1},$$

де $D_0 = x_{0\infty} - x_0(t_0), D_1 = t_1 - t_0, D_2 = t_2 - t_1$.

Вважаємо, що математична модель мехатронного пристрою у кожному з вузлів рухомості задається неперервними передавальними функціями $W_{o1}(s)$ та $W_{o2}(s)$ (рис.1). Передавальна функція

$W_{o1}(s)$ може бути обчислена, як передавальна функція послідовно з'єднаних ланок спрямованої дії. Цими ланками є силовий перетворювач із передавальною функцією $W_f(s)$ та двигун постійного струму (ДПС) із передавальною функцією $W_{DPS}(s)$, де вихідним сигналом вважається кутова швидкість ротора, тобто:

$W_{o1}(s) = W_f(s) \cdot W_{DPS}(s)$. Перший каскад (контур) складається із регулятора із передавальною функцією $W_{R1}(s)$ та об'єкта керування із передавальною функцією $W_{o1}(s)$ (рис.1). Другий каскад складається із регулятора із передавальною функцією $W_{R2}(s)$ та об'єкта керування із передавальною функцією, що дорівнює добутку передавальної функції першого каскаду (контру), $H_1(s) = \frac{W_{R1}(s) \cdot W_{o1}(s)}{1 + W_{R1}(s) \cdot W_{o1}(s)}$ на передавальну функцію $W_{o2}(s) = \frac{1}{s}$, де вихідним сигналом є кут повороту ротора ДПС.

При виконанні комп'ютерних експериментів були використані типові передавальні функції мехатронних пристроїв вузлів рухомості гуманоїдних роботів [8-12]:

$$W_f(s) = \frac{10}{0.0003 \cdot s^2 + 0.04 \cdot s + 1};$$

$$W_{DPS}(s) = \frac{1}{0.4 \cdot s^2 + 1.3 \cdot s + 1}.$$

Виконаємо первинне налаштування ПІД – регулятора першого каскаду вказаними вище методами. При первинному налаштуванні ПІД – регулятора першого каскаду (внутрішнього контуру) було отримано такі допоміжні значення параметрів:

$$K_0 = 3.5, P_0 = 0.72c;$$

$$x_0(t_0) = 0, x_{0\infty} = 10, t_0 = 0c, t_1 = 0.25c, t_2 = 2c.$$

Результат обчислення параметрів ПІД – регулятора першого каскаду (внутрішнього контуру):

$$k_{pKZ-N1} = 2.100, T_{iKZ-N1} = 0.3600c, T_{dKZ-N1} = 0.0900c;$$

$$k_{pZ-NPP1} = 0.8400, T_{iZ-NPP1} = 0.500c, T_{dZ-NPP1} = 0.1250c;$$

$$k_{pK-KPP1} = 0.6383, T_{iK-KPP1} = 0.6416c, T_{dK-KPP1} = 0.0907c.$$

Виконаємо первинне налаштування УІД – регулятора першого каскаду із використанням МЕН УІД – регулятора. Припустимо, що v та $m_{1,2,3,4}$ дорівнюють одиниці. Виконаємо обчислення частоти зрізу та параметрів УІД – регулятора першого каскаду (внутрішнього контуру). Скористаємося положеннями МЕН УІД – регулятора і в результаті отримаємо: $\omega_{z1} = 2.61 \frac{rad}{c}$,

$$T_{11} = 1.2644c, T_{31} = 0.1161c, T_{21} = 0.0116c,$$

$$T_{41} = 0.0012c. \text{ Приймаємо, що } k_{UID1} = 0.1 \cdot k_{pKZ-N1} = 0.21.$$

Перед тим, як перейти до налаштування пара-

метрів регулятора другого каскаду (рис. 1), розглянемо перехідні процеси на виході двокаскадної САК при умові, що $W_{R2}(s) = 1$. З'ясуємо питання щодо необхідності ускладнювати загальну процедуру налаштування двокаскадної САК налаштуванням регулятора для другого каскаду. Виконаємо візуальний аналіз перехідних процесів (див. рис. 4) на виході двокаскадної САК (рис. 1). Цей аналіз показує: при використанні УІД – регулятора, первинне налаштування якого виконано за допомогою запропонованого методу, плавність рухів у вузлі рухомості гуманоїдного робота буде кращою ніж при використанні ПІД – регулятору. Таким чином, якщо немає потреби зменшувати перегулювання та тривалість перехідного процесу, то можна вважати, що каскадна САК може бути побудована із підключенням лише одного УІД – регулятора у внутрішній каскад САК (зовнішній каскад вважаємо таким, що до нього підключено пропорційний регулятор із коефіцієнтом підсилення, що дорівнює одиниці). Особливо підкреслимо, що доналаштовувати УІД – регулятор непотрібно: достатньо лише первинного налаштування.

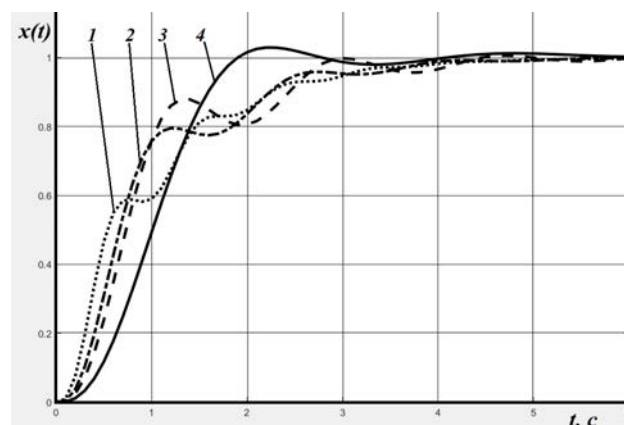


Рис. 4. Перехідні процеси на виході двокаскадної САК (рис. 1) при умові, що $W_{R2}(s) = 1$ та різних $W_{R1}(s)$: 1, 2, 3 – передавальна функція $W_{R1}(s)$ дорівнює передавальній функції ПІД – регулятора, параметри якого налаштовані методами відповідно коливань Зіглера – Нікольса, Зіглера – Нікольса при використанні перехідного процесу, Коена – Куна при використанні перехідного процесу; 4 – передавальна функція $W_{R1}(s)$ дорівнює передавальній функції УІД – регулятора

Припустимо, що все ж таки існує необхідність зменшити час тривалості перехідного процесу при збереженні плавності рухів у вузлі рухомості. Тоді виконаємо первинне налаштування ПІД – та УІД – регуляторів для другого каскаду (контру). Оскільки $W_{o2}(s) = \frac{1}{s}$, то для налаштування ПІД – регулятора можливо застосувати лише метод коливань Зіглера – Нікольса.

При первинному налаштуванні ПІД – регулятора другого каскаду (зовнішнього контуру) було отримано такі допоміжні значення параметрів

$K_0 = 3.5, P_0 = 0.72 \text{ c}$. За цими значеннями було розраховано параметри ПІД – регулятора другого каскаду:

$$k_{pKZ-N2} = 1.800, T_{iKZ-N2} = 0.3300 \text{ c}, T_{dKZ-N2} = 0.0825 \text{ c}.$$

Перейдемо до налаштування УІД – регулятора. Припустимо, що v та $m_{1,2,3,4}$ дорівнюють одиниці. При первинному налаштуванні УІД – регулятора другого каскаду (зовнішнього контуру) було отримано таку величину частоти зрізу

$\omega_{z2} = 0.99 \frac{\text{рад}}{\text{c}}$ та обчислено значення параметрів УІД – регулятора:

$$T_{12} = 3.3333 \text{ c}, T_{32} = 0.3061 \text{ c}, T_{22} = 0.0306 \text{ c},$$

$T_{42} = 0.0031 \text{ c}$. Приймаємо, що $k_{UID2} = 0.2 \cdot k_{pKZ-N2} = 0.36$.

Як бачимо (див. рис. 5), застосування у другому каскаді УІД – регулятора із первинним налаштуванням параметрів дозволяє отримати плавніші рухи у вузлі рухомості гіманоїдного робота порівняно із застосуванням первинно налаштованого ПІД – регулятора. Зауважимо, що і перегулювання буде майже відсутнє.

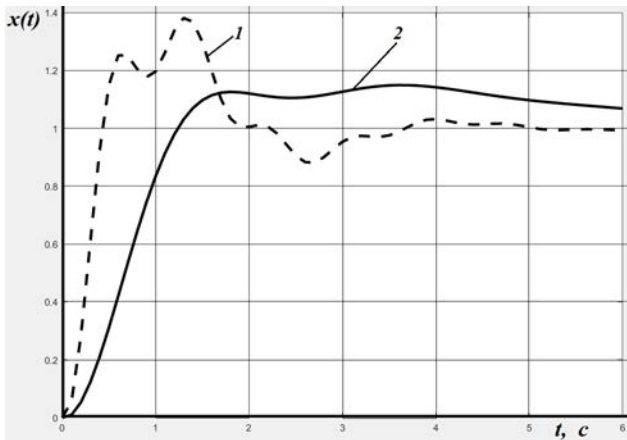


Рис. 5. Перехідні процеси на виході двокаскадної САК (рис. 1) при умові, що: 1 – передавальні функції $W_{R1}(s)$ та $W_{R2}(s)$ дорівнюють передавальним функціям ПІД – регуляторів, параметри яких налаштовані за методом коливань Зіглера – Нікольса; 2 – передавальні функції $W_{R1}(s)$ та $W_{R2}(s)$ дорівнюють передавальним функціям УІД – регуляторів при умові, що структурні параметри УІД – регуляторів v та $m_{1,2,3,4}$ дорівнюють одиниці

Для покращення результату застосування УІД – регуляторів змінимо структурні параметри УІД – регуляторів в обох каскадах (контурах) (рис.1). Припустимо, що в обох каскадах $v=1$ та $m_{1,2}=1, m_{3,4}=2$ при умові, що значення параметрів $T_{1j}, T_{3j}, T_{2j}, T_{4j}$ ($j=1,2$) та k_{UID1} залишилися незмін-

ними. Приймаємо, що $k_{UID2} = 0.5 \cdot k_{pKZ-N2}$. Час тривалості перехідного процесу вдалося зменшити майже у двічі при збереженні плавності руху та відсутності перегулювання (див. рис. 6).

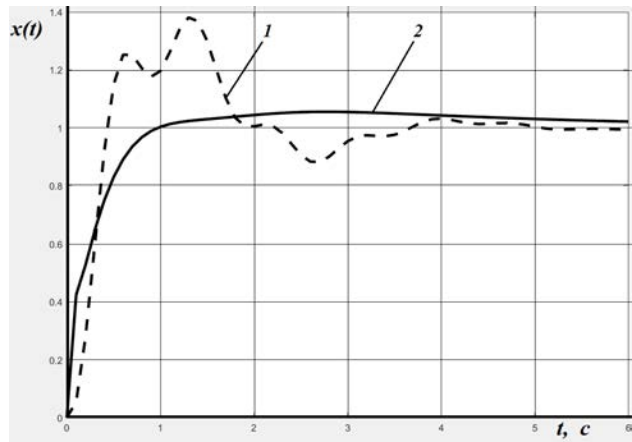


Рис. 6. Перехідні процеси на виході двокаскадної САК (рис. 1) при умові, що: 1 – передавальні функції $W_{R1}(s)$ та $W_{R2}(s)$ дорівнюють передавальним функціям ПІД – регуляторів, параметри яких налаштовані за методом коливань Зіглера – Нікольса; 2 – передавальні функції $W_{R1}(s)$ та $W_{R2}(s)$ дорівнюють передавальним функціям УІД – регуляторів при умові, що структурні параметри УІД – регуляторів v та $m_{1,2,3,4}$ дорівнюють одиниці, а $m_{3,4}=2$

Висновки

1. В якості альтернативи ПІД – регулятору для використання у каскадних SISO LTI системах автоматичного керування вузлами рухомості гуманоїдних роботів пропонується застосувати, регулятор, який задається узагальненим інтегродиференціальним контуром або з'єднанням ідеального інтегратора із узагальненими компенсаторами упередження – затримки. Цей регулятор отримав назву узагальнений інтегродиференціальний регулятор (УІД – регулятор).

2. Головна позитивна властивість УІД – регулятора порівняно із ПІД – регулятором полягає в тому, що при наявності SISO LTI математичної моделі об'єкта керування первинне параметричне налаштування УІД – регулятора дає практично прийнятний раціональний результат керування, який не потребує додаткового налаштування. Тому метод параметричного налаштування УІД – регулятора отримав назву метод експрес-налаштування узагальненого інтегродиференціального регулятора (МЕН УІД – регулятора).

3. МЕН УІД – регулятора забезпечує якість, простоту, зручність та економію часу при параметричному налаштуванні регулятора, що обґрун-

товує доцільність використання УІД – регулятора для керування мехатронними пристроями вузлів рухомості роботів в загалі і зокрема гуманоїдних роботів із підвищеними вимогами до людиноподібності рухів.

4. Наведений у статті комп'ютерний експеримент проілюстрував та підтвердив позитивні

властивості УІД – регулятора, які надають йому перевагу порівняно із ПІД – регулятором.

5. Подальші дослідження будуть спрямовані на розробку методу структурно-параметричного синтезу УІД – регулятора та його застосуванню в системах автоматичного керування із суттєвими нелінійностями.

Список літератури:

- 1_Viraktamath D. S. V. Humanoid Robot: A Review. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2021. Vol. 9, no. 8. P. 2884–2894. URL: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.37890>
- 2_An Investigation on Humanoid Robots with Biped Locomotion and Walking / A. Pon Bharathi et al. *Design, Modelling and Fabrication of Advanced Robots*. 2022. Vol. 1, no. 1. P. 55–61. URL: <https://doi.org/10.46632/dmfar/1/1/9>
- 3_SUGIUCHI H., YONESHIMA J., KOHAMA S. Development of control system for small humanoid robot. *The Proceedings of JSME annual Conference on Robotics and Mechatronics (Robomec)*. 2017. Vol. 2017. P. 2A1–C09. URL: <https://doi.org/10.1299/jsmermd.2017.2a1-c09>
- 4_Cabás Ormaechea L. M. Humanoid Robots. *Advanced Mechanics in Robotic Systems*. London, 2011. P. 1–18. URL: https://doi.org/10.1007/978-0-85729-588-0_1
- 5_Biomechanics-Inspired Control Strategies for Humanoid Robots / S. Aswini et al. *2023 10th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON)*, Gautam Buddha Nagar, India, 1–3 December 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/upcon59197.2023.10434421>
- 6_Mogos E. The fuzzy-based systems in the communication between a human and a humanoid robot. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2251, no. 1. P. 012003. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2251/1/012003>
- 7_Sulakshana Nishikant Bhatlawande, Prachi Prashant Kulkarni. Humanoid Robot. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*. 2023. P. 32
- 8_Control system design, 1 st Edishen by GOODWIN, GRAHAM C.; GRAEBE, STEFAN F.; SALGADO, MARIO E. Prentice Hall, 2001.
- 9_Ірлик Ю. А., Стопакевич А. О. Аналіз перспектив застосування технологій штучного інтелекту для побудови автономних промислових систем автоматичного керування. *Automation of technological and business processes*. 2024. Т. 15, № 4. С. 8–13. URL: <https://doi.org/10.15673/atbp.v15i4.2578>
- 10_Development of a humanoid robot control system based on AR-BCI and SLAM navigation / Y. Wang et al. *Cognitive Neurodynamics*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1007/s11571-024-10122-z>
- 11_Cetin O. Present Applications of Humanoid Robots and Fuzzy Control. *Toward Humanoid Robots: The Role of Fuzzy Sets*. Cham, 2021. P. 237–251. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-67163-1_9
- 12_Методика синтезу регуляторів для цифрової системи автоматичного керування антропоморфним роботом / О. І. Лисенко та ін. *Problems of Informatization and Management*. 2021. Т. 4, № 68. С. 44–51. URL: <https://doi.org/10.18372/2073-4751.68.16526>
- 13_Морнева М. О., Голубєва С. М., Торопов А. С. Цифрові системи автоматичного керування в мехатронних системах. *Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2021. № 5 (269). С. 20–23. URL: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-269-5-20-23>
- 14_Compliant Motion Control of Wheel-Legged Humanoid Robot on Rough Terrains / L. Zhao et al. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2023. P. 1–11. URL: <https://doi.org/10.1109/tmech.2023.3320762>

Lysenko O.I., Tachynina O.M., Chumachenko S.M., Kyselov V.B., Guida O.H., Ometsynska N.V.
CASCADE SISO LTI AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF THE ELECTRIC DRIVE
OF A MOBILITY UNIT OF A MILITARY HUMANOID ROBOT

The paper investigates the possibility of applying a generalized integro-differentiating controller (GID controller) as an effective alternative to the conventional PID controller in cascade SISO LTI automatic control systems for mechatronic devices of mobility units in humanoid robots. The expediency of using cascade (two-loop) systems is substantiated, as they provide improved control performance, in particular reducing the influence of external and parametric disturbances, shortening transient response time, and increasing the accuracy of reproducing prescribed motions. It is shown that eliminating the inner loop leads to deterioration of the system's dynamic characteristics, which is critical for ensuring smoothness and safety of humanoid robot motions.

The problem of complexity in parametric tuning of a large number of PID controllers in multiloop systems typical for modern robotic complexes, where the number of loops may reach thousands, is considered. It is established that classical tuning methods (Ziegler–Nichols, Cohen–Coon) require significant time zampam, with the major portion spent on parameter refinement using computer simulation.

The use of the GID controller is proposed, implemented as a generalized integro-differentiating loop or a series connection of an ideal integrator with lead–lag compensators. A method for rapid tuning of the GID controller (rapid tuning method, RTM GID) is developed, which allows obtaining rational controller parameters at the initial tuning stage based on a known mathematical model of the plant, without the need for further optimization. The main stages of the method are described, including open-loop formation, selection of structural parameters, determination of the cutoff frequency, and calculation of controller parameters.

The results of computer simulation are presented, demonstrating that the application of the GID controller improves transient performance indicators, in particular by reducing oscillations, eliminating overshoot, and increasing motion smoothness compared to PID controllers. It is shown that in some cases the use of only one GID controller in the inner loop is sufficient to achieve acceptable system characteristics. The proposed approach provides a significant reduction in tuning time, ease of implementation, and improved control efficiency, confirming the перспективність of using GID controllers in humanoid robot control systems with enhanced requirements for human-like motion.

Keywords: automatic control system, SISO LTI system, GID controller, PID controller, integro-differentiating loop, lead–lag compensator, mechatronic systems, humanoid robots, mobility units.

Дата першого надходження статті до видання: 18.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Луфференко С.Л.

<https://orcid.org/0009-0002-1691-6438>

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

Щербина І.С.

<https://orcid.org/0009-0004-8373-7522>

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ІНДИВІДУАЛЬНОЇ ОСВІТНЬОЇ ТРАЄКТОРІЇ ЯК ЗАДАЧА ОПТИМІЗАЦІЇ

В умовах цифровізації освіти та розвитку інтелектуальних освітніх систем актуальною відається задача формування для кожного здобувача освіти індивідуальної освітньої траєкторії. Традиційні освітні програми в загальному випадку відсутні механізми врахування індивідуальних особливостей кожного здобувача освіти, а також немає механізмів адаптації освітньої програми в разі відмінних показників здобувача освіти у вивченні окремих освітніх компонентів. Усі ці причини ведуть до необхідності використання методів, що відносяться до інформаційних систем, математичного моделювання та оптимізації для формування індивідуальної освітньої траєкторії. Мета дослідження – розроблення математичної моделі формування індивідуальної освітньої траєкторії, що є випадком задачі оптимізації, що відображає процес управління навчальним процесом у вузці або закладі освіти. Індивідуальна освітня траєкторія у випадку такого моделювання вважається послідовністю освітніх компонентів (навчальних модулів), що мають передусім сприяти досягненню відомих освітніх компетентностей з мінімізацією витрат часу чи максимізацією ефективності навчання. В дослідження викладено спосіб формування індивідуальної освітньої траєкторії на основі математичної моделі. У моделі вивчається орієнтований граф освітніх компонентів. Вершинами графа є освітні компоненти (навчальні дисципліни), а ребрами визначаються логічні залежності між даними компонентами. Задача формування індивідуальної освітньої траєкторії викликає задачу оптимізації з метою визначення оптимальної послідовності вивчення освітніх компонентів із врахуванням обмежень, що відносяться до передумов вивчення окремих освітніх дисциплін. Розроблено математичну модель формування індивідуальної освітньої траєкторії. В моделі використовуються математичні змінні, визначена функція цілі та встановлені обмеження відносно можливих витрат часу, ефективності навчання, рівня сформованості освітніх компетентностей та інших вимог до відомого досвіду вивчення окремих освітніх компонентів. Математична модель дозволяє визначати оптимальний маршрут вивчення освітніх компонентів, враховуючи індивідуальні характеристики кожного здобувача освіти. Результати дослідження можуть бути використані в інформаційних системах підтримки прийняття рішень у сфері освіти, електронному навчанні або у платформах адаптивного навчання для автоматизованого формування індивідуальних освітніх траєкторій кожного здобувача освіти.

Ключові слова: індивідуальна освітня траєкторія, математична модель, оптимізація, освітні інформаційні системи, адаптивне навчання, персоналізація навчання.

Постановка проблеми. Наявність сучасних цифрових платформ, адаптивних систем навчання та інтелектуальних рекомендаційних сервісів дозволяє досить високий рівень персоналізації освітнього процесу. Проте, до сьогодні відсутній універсальний формалізований підхід до вирішення задачі індивідуальної освітньої траєкторії. Системи і платформи, які існують на сьогодні, забезпечують персоналізацію окремими дисциплінами чи рекомендують навчальні матеріали

для здобувачів освіти. А також здійснюють аналіз успішності кожного окремого здобувача освіти. Проблема в тому, що вони не вирішують задачу одночасного вирішення багатьох параметрів, які можуть бути визначені для кожного окремого здобувача освіти: цілі, властивості, взаємозв'язок між компонентами освітнього процесу, обсяг навчання, часові обмеження та темп здобувача освіти. Індивідуальна освітня траєкторія має відповідати певним освітнім цілям, що встановлено

для здобувача освіти, вимогам до його освітніх компетентностей, обмеженням часу, відокремленості вивчення окремих дисциплін. Щоб вирішити таку задачу, можна побудувати математичну модель для відображення вказаної задачі і встановлення критерії оптимізації. Тільки така модель дозволяє перейти від ідеї персоналізації освіти до побудови алгоритму формування для кожного окремого здобувача освіти оптимального маршруту навчання.

Створення математичної моделі індивідуальної освітньої траєкторії є актуальною науковою задачею, оскільки дозволяє встановити аналітичні залежності між окремими параметрами траєкторії: самими навчальними компонентами, їх ваговими коефіцієнтами, часом вивчення та досягненням результатів навчання. Розв'язання поставленої задачі дозволить виробити інформаційні системи підтримки прийняття рішень у сфері освіти та автоматизації формування індивідуальних освітніх траєкторій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема індивідуальної освітньої траєкторії в дослідженні Федонюка А. та ін. [1, с. 135] вивчалась в контексті створення адаптивної системи рекомендацій вибіркового освітніх компонентів для студентів. Встановлено можливість створення індивідуального освітнього плану на основі визначення освітніх інтересів студентів. Полторацький М. розглядає можливість створення персоналізованої освітньої системи, яка будується на технологіях Semantic Web [2, с. 255]. Meng L. та ін. досліджують можливість створення персоналізованого навчального маршруту на основі діагностики здобувача освіти [3, с. 123]. Ма У. та ін. [4, с. 6] вивчають можливість створення методу рекомендації навчального маршруту, який використовував багатоалгоритмічний підхід. У праці Лі С. та ін. [5, с. 7] використовується алгоритм мурашиної оптимізації для створення персоналізованого навчального маршруту для вивчення освітніх компонентів у режимі онлайн. У вказаних наукових роботах розглядається головне завдання для рекомендації освітніх компонентів, а формулювання задачі математичної оптимізації освітньої траєкторії вони не розглядали.

Важливий напрям досліджень пов'язаний із використанням графових моделей подання освітніх знань. Так, запропоновано рекомендаційну систему на основі графа знань, що дозволяє аналізувати взаємозв'язки між освітніми об'єктами та навчальними активностями [6, с. 2]. В інших джерелах [7, с. 110; 8, с. 3] також застосовується

графове подання структури навчального контенту, яке забезпечує можливість врахування передумов вивчення дисциплін та логічних залежностей між навчальними модулями. Проте зазначені моделі здебільшого орієнтовані на рекомендацію навчальних матеріалів, а не на формалізоване визначення оптимальної освітньої траєкторії в межах освітньої програми.

Подальший розвиток досліджень у цьому напрямі пов'язаний із використанням методів машинного навчання та нейромережових моделей. У подальшому передбачається їх активне застосування для розв'язання відповідних задач. У роботі Chen Y.-H. та ін. представлені рекомендації визначення навчального маршруту для платформ MOOCs на основі LSTM-мережі [9, с. 41]. Інші наукові результати відокремили спеціальну динамічну рекомендаційну систему навчання на базі модифікованої LSTM-моделі [10, с. 3]. У дослідженні Ма D. та ін. [11, с. 5] представлено визначення освітнього маршруту на основі deep Q-networks. Індивідуальна освітня траєкторія визначається науковцями Halдар S., Zhou L.-Y. та ін. шляхом використання методів підкріплювального навчання та графових моделей на основі поєднання knowledge graph і reinforcement learning [12, с. 3481; 13, с. 2]. Sun Y. та ін. дослідили використання комбінованих алгоритмів оптимізації та нейромережових моделей у встановленні ефективного маршруту вивчення дисциплін [14, с. 6; 15, с. 4].

Таким чином, аналіз наведених досліджень свідчить про значний розвиток рекомендаційних систем і алгоритмів персоналізації навчання в інформаційних системах освіти. Водночас більшість існуючих підходів орієнтована на побудову рекомендаційних алгоритмів або використання методів машинного навчання для вибору освітніх ресурсів. При цьому питання формалізації індивідуальної освітньої траєкторії у вигляді математичної моделі оптимізації, яка б одночасно враховувала структуру освітньої програми, передумови вивчення дисциплін, часові обмеження та індивідуальні характеристики здобувача освіти, залишається недостатньо дослідженим. Саме ця обставина зумовлює необхідність подальших досліджень у напрямі розроблення математичної моделі індивідуальної освітньої траєкторії як задачі оптимізації в інформаційних системах управління навчальним процесом.

Постановка завдання. Метою дослідження є розроблення математичної моделі індивідуальної освітньої траєкторії здобувача освіти як задачі

оптимізації в інформаційних системах управління навчальним процесом. Дослідження відображають можливості створення алгоритмів вибору послідовності вивчення освітніх компонентів з урахуванням індивідуальних параметрів здобувача освіти.

Для досягнення мети статті передбачено розв'язання таких завдань: формалізувати структуру освітньої програми; визначити параметри визначення індивідуальної освітньої траєкторії (послідовність вивчення дисциплін, витрати часу на вивчення дисциплін, рівень сформованості освітніх компетентностей, визначення освітніх потреб здобувача освіти); сформувати математичну модель визначення індивідуальної освітньої траєкторії; зазначити можливості визначення оптимальної індивідуальної освітньої траєкторії як результату розв'язання задачі оптимізації; дослідити можливості використання математичної моделі індивідуальної освітньої траєкторії в інформаційних системах.

Реалізація зазначених завдань дозволяє сформувати математичну модель для виведення алгоритму побудови індивідуальної освітньої траєкторії, що забезпечує вибір оптимального для здобувача освіти маршруту вивчення освітніх компонентів у відповідності до його індивідуальних параметрів, освітньої програми та вимог до ефективності навчання. Математична модель, запропонована в статті, може бути використана для створення інтелектуальних освітніх систем, що забезпечують персоналізоване навчання з автоматичним встановленням індивідуальних освітніх маршрутів для кожного здобувача освіти.

Виклад основного матеріалу. Формалізація структури індивідуальної освітньої траєкторії. Для побудови математичної моделі індивідуальної освітньої траєкторії розглянемо структуру освітньої програми як множину взаємопов'язаних освітніх компонентів. Кожен освітній компонент відповідає певній дисципліні або навчальному модулю та характеризується набором параметрів, що визначають його роль у формуванні компетентностей здобувача освіти.

Нехай освітня програма містить множину дисциплін (1):

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}, \quad (1)$$

де d_i – i -та навчальна дисципліна або модуль освітньої програми.

Зв'язки між дисциплінами, що визначають передумови їх вивчення, доцільно подати у вигляді орієнтованого графа (2):

$$G = (D, E), \quad (2)$$

де E – множина ребер графа, що відображає залежності між дисциплінами. Якщо дисципліна d_i є передумовою для дисципліни d_j , то між ними існує ребро (3):

$$(d_i, d_j) \in E. \quad (3)$$

Таким чином, освітня програма формалізується як орієнтований ациклічний граф навчальних компонентів, що визначає допустимі послідовності їх вивчення.

Математична модель індивідуальної освітньої траєкторії. Індивідуальну освітню траєкторію будемо розглядати як послідовність дисциплін (4):

$$T = \{d_{i_1}, d_{i_2}, \dots, d_{i_k}\}, \quad (4)$$

яка задовольняє структурним обмеженням освітньої програми та забезпечує досягнення заданих результатів навчання.

Кожній дисципліні d_i поставимо у відповідність такі параметри:

- t_i – час або навчальне навантаження на опанування дисципліни;
- w_i – ваговий коефіцієнт внеску дисципліни у формування компетентностей;
- c_i – рівень складності або індивідуальна вартість навчання.

Тоді інтегральна ефективність освітньої траєкторії може бути представлена функцією (5):

$$F(T) = \sum_{i=1}^n w_i x_i, \quad (5)$$

де

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо дисципліна } d_i \text{ входить до траєкторії,} \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases}$$

Таким чином, задача формування індивідуальної освітньої траєкторії може бути сформульована як задача оптимізації (6):

$$\max F(T) = \sum_{i=1}^n w_i x_i. \quad (6)$$

Система обмежень моделі. Формування освітньої траєкторії повинно враховувати ряд обмежень.

1. Обмеження на передумови вивчення дисциплін.

Якщо дисципліна d_j може вивчатися лише після дисципліни d_i , то виконується умова (7):

$$x_j \leq x_i. \quad (7)$$

2. Обмеження на загальний навчальний час (8):

$$\sum_{i=1}^n t_i x_i \leq T_{\max}, \quad (8)$$

де $T_{\max}$ – максимально допустимий обсяг навчального навантаження.

3. Обмеження на досягнення компетентностей.

Нехай k_{ij} – внесок дисципліни d_i у формування j -тої компетентності. Тоді (9):

$$\sum_{i=1}^n k_{ij} x_i \geq K_j, \quad (9)$$

де K_j – мінімально необхідний рівень сформованості компетентності.

Оптимізація освітньої траєкторії. Таким чином, задача побудови індивідуальної освітньої траєкторії зводиться до комбінаторної задачі оптимізації (10):

$$\max \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (10)$$

за умов (11):

$$\sum_{i=1}^n t_i x_i \leq T_{\max}, \quad (11)$$

$$x_j \leq x_i \forall (d_i, d_j) \in E, \quad \sum_{i=1}^n k_{ij} x_i \geq K_j.$$

Розв'язання цієї задачі дозволяє визначити оптимальну послідовність освітніх компонентів, яка забезпечує максимальну ефективність навчання при заданих ресурсних обмеженнях.

Аналіз результатів моделювання. На основі запропонованої моделі можуть бути побудовані

залежності, що відображають вплив різних параметрів освітнього процесу на структуру оптимальної траєкторії. Зокрема, аналіз функції цілі дозволяє оцінити вплив вагових коефіцієнтів дисциплін на формування навчального маршруту, а варіювання параметра $T_{\max}$ дає можливість дослідити залежність між обсягом навчального часу та кількістю дисциплін у траєкторії. Для перевірки запропонованої математичної моделі було проведено моделювання процесу формування індивідуальної освітньої траєкторії для умовної освітньої програми, що містить набір навчальних дисциплін. Кожна дисципліна характеризується навчальним навантаженням, ваговим коефіцієнтом внеску у формування компетентностей та рівнем складності. У таблиці 1 наведено приклад параметрів освітніх компонентів, що використовуються для формування індивідуальної освітньої траєкторії.

Використовуючи математичну модель (1–4), було визначено оптимальну послідовність вивчення дисциплін, яка забезпечує максимальне значення функції ефективності навчання при обмеженні на загальний навчальний час. На рис. 1 показано графік залежності ефективності освіт-

Таблиця 1

Параметри освітніх компонентів для формування індивідуальної освітньої траєкторії

№	Дисципліна	Навчальне навантаження (t_i), год	Ваговий коефіцієнт компетентності (w_i)	Рівень складності (c_i)
1	Математичне моделювання	120	0.90	0.8
2	Алгоритми та структури даних	150	0.85	0.9
3	Бази даних	120	0.75	0.7
4	Інтелектуальні системи	90	0.80	0.6
5	Машинне навчання	120	0.95	0.9

Джерело: створено авторами.

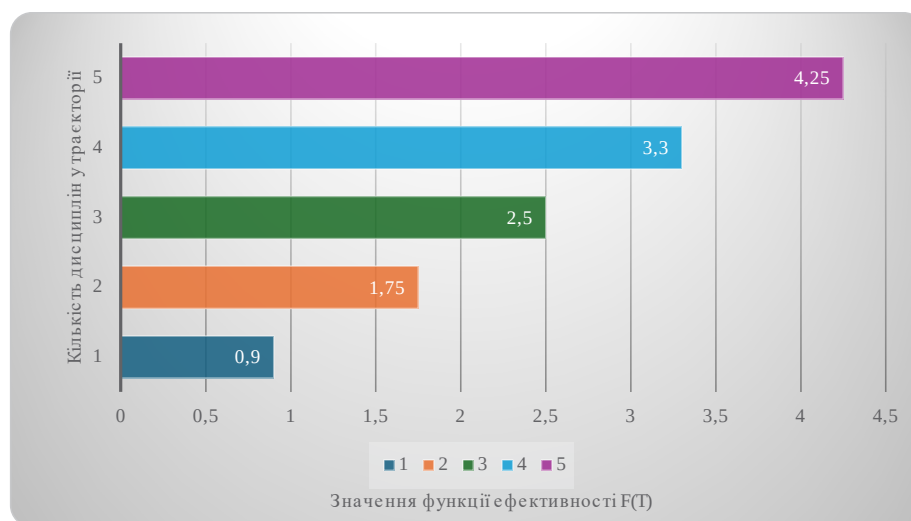


Рис. 1. Залежність ефективності освітньої траєкторії від кількості освітніх компонентів

Джерело: створено авторами.

ньої траєкторії від кількості обраних освітніх компонентів.

Аналіз отриманих результатів показує, що зі збільшенням кількості дисциплін ефективність освітньої траєкторії зростає до певного оптимального значення. Після досягнення оптимальної точки подальше збільшення кількості дисциплін не приводить до суттєвого підвищення ефективності через обмеження навчального часу та зростання складності навчального навантаження. Отримані результати свідчать, що запропонована математична модель дозволяє визначати оптимальну структуру індивідуальної освітньої траєкторії з урахуванням параметрів освітньої програми та індивідуальних характеристик здобувача освіти. Використання цієї моделі в інформаційних системах управління навчальним процесом забезпечує можливість автоматизованого формування персоналізованих навчальних маршрутів. Запропонована математична модель дозволяє формалізувати процес формування індивідуальної освітньої траєкторії та може бути використана в інформаційних системах підтримки прийняття рішень, адаптивних системах електронного навчання та інтелектуальних освітніх платформах для автоматизованого планування освітнього маршруту здобувача освіти.

Висновки. У статті розглянута проблема формування індивідуальної освітньої траєкторії студента в контексті розвитку інформаційних систем управління освітніми процесами. Аналіз існуючих досліджень показує, що більшість підходів до індивідуалізації освітніх процесів ґрунтується на системах рекомендацій, методах машинного навчання та графах знань, однак у більшості випадків питання індивідуальної освітньої траєкторії не розглядається як проблема оптимізації.

У результаті дослідження запропоновано математичну модель формування освітньої траєкто-

рії особистості. Освітня програма представлена у вигляді орієнтованого графа освітніх компонентів. Визначено основні параметри моделі, що включають набір навчальних дисциплін, вагові коефіцієнти навчальних дисциплін, часові характеристики навчальних дисциплін та внесок навчальних дисциплін у формування компетентностей студента. На основі цих параметрів формуються цільова функція та обмеження моделі, що дозволяють розглядати формування освітньої траєкторії як задачу оптимізації. Запропонована модель дає змогу визначити оптимальну послідовність вивчення навчальних дисциплін з урахуванням логічних залежностей між навчальними компонентами, навчальним навантаженням та особливостями студента. У результаті модельного моделювання можна визначити, що використання такої математичної моделі дозволить підвищити ефективність планування освітніх траєкторій студентів та дає підстави для автоматизації індивідуальних освітніх траєкторій в системах електронного навчання.

Практична цінність результатів дослідження полягає у можливості використання розробленої моделі в інформаційних системах підтримки прийняття освітніх рішень, в адаптивних освітніх платформах і системах управління навчальними процесами. Наступними кроками досліджень у цьому напрямі буде подальший розвиток математичної моделі формування індивідуальних освітніх траєкторій з урахуванням поведінки студентів, використання методів машинного навчання для визначення результатів навчання студентів, а також інтеграція запропонованої моделі з системами рекомендацій та моделями графів знань. Іншим можливим кроком дослідження буде розробка прототипу інформаційної системи, яка б реалізувала запропоновану модель оптимізації індивідуальних освітніх траєкторій в освітніх процесах.

Список літератури:

1. Федонюк А., Палій А., Михальчук Я., Юнчик В. Адаптивна система рекомендацій вибіркокових освітніх компонентів для студентів. *Інформаційні технології і засоби навчання*. 2025. Т. 110, № 6. С. 135–150. <https://doi.org/10.33407/itlt.v110i6.6195>
2. Полторацький М. Моделювання персоналізованої освітньої системи на основі технологій Semantic Web. *Інформаційні технології і засоби навчання*. 2025. Т. 110, № 6. С. 254–270. <https://doi.org/10.33407/itlt.v110i6.6039>
3. Meng L., Zhang W., Chu Y., Zhang M. LD-LP Generation of Personalized Learning Path Based on Learning Diagnosis. *IEEE Transactions on Learning Technologies*. 2021. Vol. 14, № 1. P. 122–128. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.767837>
4. Ma Y., Wang L., Zhang J., Liu F., Jiang Q. A Personalized Learning Path Recommendation Method Incorporating Multi-Algorithm. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, № 10. Art. 5946. <https://doi.org/10.3390/app13105946>
5. Li S., Chen H., Liu X., Li J., Peng K., Wang Z. Online Personalized Learning Path Recommendation Based on Saltatory Evolution Ant Colony Optimization Algorithm. *Mathematics*. 2023. Vol. 11, № 13. Art. 2792. <https://doi.org/10.3390/math11132792>

6. Troussas C., Krouska A. Path-Based Recommender System for Learning Activities Using Knowledge Graphs. *Information*. 2023. Vol. 14, № 1. Art. 9. <https://doi.org/10.3390/info14010009>
7. Zhang X., Liu S., Wang H. Personalized Learning Path Recommendation for E-Learning Based on Knowledge Graph and Graph Convolutional Network. *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering*. 2023. Vol. 33, № 1. P. 109–131. <https://doi.org/10.1142/S0218194022500681>
8. Liu C., Zhang H., Zhang J., Zhang Z., Yuan P. Design of a Learning Path Recommendation System Based on a Knowledge Graph. *International Journal of Information and Communication Technology Education*. 2023. Vol. 19, № 1. <https://doi.org/10.4018/IJICTE.319962>
9. Chen Y.-H., Huang N.-F., Tzeng J.-W., Lee C.-A., Huang Y.-X., Huang H.-H. A Personalized Learning Path Recommender System with LINE Bot in MOOCs Based on LSTM. In: *Proceedings of the 2022 11th International Conference on Educational and Information Technology (ICEIT)*. Chengdu, China, 2022. P. 40–45. <https://doi.org/10.1109/ICEIT54416.2022.9690754>
10. Ahmadian Yazdi H., Seyyed Mahdavi S. J., Ahmadian Yazdi H. Dynamic educational recommender system based on Improved LSTM neural network. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, № 1. Art. 4381. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54729-y>
11. Ma D., Zhu H., Liao S., Chen Y., Liu J., Tian F., Chen P. Learning path recommendation with multi-behavior user modeling and cascading deep Q networks. *Knowledge-Based Systems*. 2024. Vol. 294. Art. 111743. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2024.111743>
12. Haldar S., Sengupta S., Das A. K. Personalized Learning Path Recommendation using Graph Reinforcement Learning. *Procedia Computer Science*. 2025. Vol. 258. P. 3480–3489. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.04.604>
13. Zhou L.-Y., Wang Y.-Y. Simulation of personalized english learning path recommendation system based on knowledge graph and deep reinforcement learning. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Art. 34554. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-17918-x>
14. Imamah, Yuhana U. L., Djunaidy A., Purnomo M. H. Enhancing students' performance through dynamic personalized learning path using ant colony and item response theory (ACOIRT). *Computers and Education: Artificial Intelligence*. 2024. Vol. 7. Art. 100280. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2024.100280>
15. Sun Y. Construction and optimization of personalized learning paths for English learners based on SSA-LSTM model. *Systems and Soft Computing*. 2025. Vol. 7. Art. 200218. <https://doi.org/10.1016/j.sasc.2025.200218>

Luferenko S.L., Shcherbyna I.S. MATHEMATICAL MODEL OF INDIVIDUAL EDUCATIONAL TRAJECTOR AS AN OPTIMIZATION PROBLEM

In the conditions of digitization of education and the development of intellectual educational systems, the task of forming an individual educational trajectory for each student is considered urgent. Traditional educational programs generally do not have mechanisms for taking into account the individual characteristics of each student, and there are also no mechanisms for adapting the educational program in case of excellent indicators of the student in the study of individual educational components. All these reasons lead to the need to use methods related to information systems, mathematical modelling and optimization for the formation of an individual educational trajectory. The purpose of the study is to develop a mathematical model of the formation of an individual educational trajectory, which is a case of an optimization problem that reflects the process of managing the educational process in a school or an educational institution. An individual educational trajectory in the case of such modelling is considered a sequence of educational components (educational modules), which should primarily contribute to the achievement of known educational competencies with the minimization of time spent or the maximization of learning efficiency. The method of forming an individual educational trajectory based on a mathematical model is described in the study. The model studies an oriented graph of educational components. The vertices of the graph are the educational components (educational disciplines), and the edges define the logical dependencies between these components. The task of forming an individual educational trajectory involves the task of optimization in order to determine the optimal sequence of studying educational components, taking into account the limitations related to the prerequisites of studying individual educational disciplines. A mathematical model of the formation of an individual educational trajectory has been developed. Mathematical variables are used in the model, the goal function is defined, and limitations are set regarding possible time costs, learning efficiency, the level of formation of educational competencies, and other requirements for the known experience of studying individual educational components. The mathematical model allows you to determine the optimal route of studying educational components, taking into account the individual characteristics of each student of education. The results of the research can be used in decision support information systems in the field of education, e-learning or in adaptive learning platforms for the automated formation of individual educational trajectories of each student.

Keywords: individual educational trajectory, mathematical model, optimization, educational information systems, adaptive learning, personalization of learning.

Дата першого надходження статті до видання: 28.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Люшенко А.М.

<https://orcid.org/0009-0004-0410-3100>

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова

МОДЕЛІ ПРОЕКТУВАННЯ ТА СИНХРОНІЗАЦІЇ ДАНИХ ДЛЯ ОФЛАЙН-ПЕРШОЧЕРГОВИХ МАСШТАБОВАНИХ МОБІЛЬНИХ ЗАСТОСУНКІВ

Є цілий клас мобільних задач, де підключення до мережі – не ресурс, а перешкода. Польовий лікар не чекає сигналу. Логіст у зоні слабого покриття – теж. Стаття про те, як проектувати застосунки, в яких офлайн є нормою, а не аварійним режимом.

Зберегти дані локально – це вирішувана задача. Справжня складність виникає тоді, коли два пристрої без з'єднання між собою незалежно змінювали один і той самий запис, і мережа нарешті відновила. Яка з версій правильна? Наявні рішення відповідають на це питання лише частково: PouchDB не має пріоритизації черги, Firebase Firestore як baseline втрачає 7,1% операцій (LWW-стратегія на Samsung A53 дає 8,3% – це різні системи), AppSync прив'язаний до інфраструктури AWS.

У роботі запропоновано трирівневу модель: Local Store, Operation Queue і Sync Layer. Кожен рівень відповідає за своє і не залежить від реалізації сусіднього – це дає змогу замінювати компоненти незалежно. Конфлікти виявляються через векторні годинники ще до передачі даних на сервер. Автоматичне злиття відбувається через CRDT-структури: G-Counter для лічильників, OR-Set для наборів, LWW-Register для некритичних полів. Те, що неможливо злити автоматично, передається на рівень застосунку.

Формула затримки синхронізації L_{sync} доповнена п'ятою складовою – $L_{reconciliation}$, яка відсутня в попередніх моделях. При офлайн-сесії понад 30 хвилин вона досягала 97 мс – більше, ніж саме CRDT-злиття. Без урахування цієї складової реальна затримка систематично недооцінюється. Для вимірювання надійності синхронізації введено метрику $C = 1 - (N_{conflicts} / N_{updates})$.

Модель перевірено на трьох реальних пристроях – Samsung Galaxy A53, Apple iPhone 13, Xiaomi Redmi Note 11 – з 200 циклами синхронізації на кожен мережевий профіль. Гібридна CRDT-стратегія показала нульову втрату операцій при 94,7% автоматичного вирішення конфліктів і метрику C в діапазоні 0,943–0,951. Для порівняння: стратегія LWW при тих самих умовах втратила 8,3% операцій. Модель не залежить від хмарного провайдера і розгортається на будь-якій мобільній платформі без змін архітектури.

Ключові слова: офлайн-першочергові мобільні застосунки, розподілені мобільні системи, синхронізація мобільних даних, eventual consistency, реплікація офлайн-даних, стратегії вирішення конфліктів, управління розподіленими мобільними даними, масштабовані мобільні архітектури.

Постановка проблеми. Мобільний застосунок без інтернету – це не помилка дизайну. Це реальність. Підземний транспорт, польова медицина, логістика у зонах зі слабким покриттям – усюди зв'язок нестабільний або відсутній. Якщо застосунок зависає без мережі, він непридатний для цих умов.

Offline-first це підхід, де локальне сховище є основним джерелом правди. З'єднання з мережею слугує лише для синхронізації даних між вузлами. Запис і читання відбуваються локально завжди. Це інша логіка, ніж «кешувати дані на випадок офлайну»: там мережа є основною, кеш – запасний. Тут навпаки. Основна складність

не в самому офлайн-режимі, зберегти дані на локальному рівні не становить труднощів. Проблема виникає вже тоді, коли той самий запис редагують кілька користувачів із різних пристроїв без мережі між ними. Коли з'єднання відновлюється – яка версія правильна? Або жодна з них не є повною?

Теорема CAP [1] описує цей компроміс: розподілена система не може одночасно гарантувати узгодженість, доступність і стійкість до мережевих ізоляцій. Для мобільних пристроїв втрата зв'язку зазвичай є нормою, тому вибір завжди на користь доступності й eventual consistency.

Відповідальність за вирішення конфліктів лягає на рівень застосунку. Проте наявні рішення, такі як PouchDB, Firebase Firestore, AWS AppSync, розв'язують задачу лише частково. PouchDB не має вбудованої пріоритизації черги, Firebase Firestore втрачає 7,1% операцій через LWW-семантику, AppSync прив'язаний до екосистеми AWS. Потрібна архітектура, яка здатна функціонувати незалежно від конкретного провайдера.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Брюер [1] сформулював теорему CAP у 2000 році. Практичний висновок для мобільних платформ: потрібно проектувати на AP-моделі (доступність + стійкість до розділень), а узгодженість досягати після відновлення зв'язку. Brewer [17] у подальших роботах уточнив: CAP не означає відмову від узгодженості – вона просто відкладається.

Shapiro et al. [2] запропонували CRDT – структури даних, злиття яких математично не породжує конфліктів. G-Counter, OR-Set, LWW-Register – кожна структура має визначену операцію merge. Ця робота змінила підхід до реплікації: замість протоколу координації – властивості самих даних. Kleppmann і Beresford [18] розширили цю концепцію до JSON-сумісного CRDT, що відкрило шлях до практичного застосування у мобільних застосунках.

Vogels [3] описав Amazon Dynamo: навіть система масштабу Amazon обрала eventual consistency заради доступності. Клієнт отримує конфліктні версії і сам вирішує злиття. DeCandia et al. [11] деталізували технічну реалізацію Dynamo – зокрема, підхід до векторних годинників і стратегію "reconciliation at read time", яка суттєво вплинула на запропоновану модель.

PouchDB [4] реалізує CouchDB-реплікацію у JavaScript і зберігає конфліктні версії явно через дерево ревізій. Firebase Firestore [5] простіший: перемагає останній запис за timestamp – але семантично небезпечний для транзакційних даних. AWS AppSync [6] пропонує Delta Sync через GraphQL, але вимагає прив'язки до AWS. Kleppmann [7] зібрав найповніше практичне зведення від векторних годинників до CRDT і патернів реплікації.

Матерн [15] заклав математичні основи векторних годинників. Bailis і Ghodsi [10] детально розглянули обмеження eventual consistency – і показали, де вона справді надійна, а де ні. Terry et al. [8] ще у 1995 році розробили принципи управління конфліктами у слабо зв'язаних сховищах. Ці принципи досі актуальні для мобільного контексту.

Варто також відзначити роботи, що формують ширший контекст дослідження. Almeida [9] у нещодавньому огляді ACM Computing Surveys систематизує підходи до CRDT – від operation-based до delta-state-based – і прояснює типові хибні уявлення, зокрема щодо комутативності і монотонності. Ця робота є важливим теоретичним доповненням до практичних результатів дослідження. Lakshman і Malik [13] описують Cassandra як промисловий приклад eventual consistency з tunable consistency – корисний орієнтир для порівняння підходів. Weiss et al. [14] розробили Logoot-Undo для P2P-редагування, що демонструє застосування CRDT-принципів у розподілених документах. Helland [12] обґрунтовує незмінність даних як архітектурний принцип, суміжний з tombstone-логікою запропонованої моделі. Gray et al. [16] класично описують небезпеки реплікації – їхні спостереження залишаються актуальними для розуміння меж будь-якої стратегії синхронізації. Shapiro і Preguiça [19] у ранній роботі заклали формальні основи комутативних реплікованих типів даних, на яких базується CRDT-підхід статті. Варто згадати й нові offline-first фреймворки, що з'явилися у 2023–2024 роках: Replicache (оптимістичні мутації з серверною авторитетністю), PowerSync (декларативна синхронізація SQLite з PostgreSQL) і ElectricSQL (CRDT-based реплікація поверх Postgres). Вони підтверджують актуальність теми, але кожен прив'язаний до конкретного стеку або хмарного провайдера. Загальний висновок: готового provider-agnostic рішення для high-load офлайн-сценаріїв з формалізованою семантикою конфліктів немає. Потрібна модель, що поєднує формальний опис конфліктної семантики, адаптивне управління чергою і кількісну оцінку затримки для мобільного середовища.

Постановка завдання. Розробити архітектурну модель offline-first мобільного застосунку, що включає формалізований механізм синхронізації на основі векторних годинників і CRDT, розширену формулу затримки L_{sync} з п'ятьма компонентами, метрику узгодженості C , алгоритм адаптивного управління чергою та порівняльний аналіз стратегій на реальних мобільних платформах. Модель не повинна залежати від конкретного хмарного провайдера.

Виклад основного матеріалу. Трирівнева архітектура та концептуальна рамка. Запропонована модель будується на трьох рівнях із чітко розділеною відповідальністю. Local Store – основне сховище. Усі читання і записи відбуваються тут незалежно від стану мережі. Реалізується на

SQLite через WatermelonDB [20]. Кожен запис містить поле `vector_clock` і `tombstone`-прапорець для логічного видалення.

Operation Queue – накопичувач мутацій. Кожна операція записується з метаданими: `priority`, `retry_count`, `created_at`, `estimated_size`. При офлайн черга зберігається на диску. При відновленні мережі – сортується за пріоритетом і передається на сервер. Черга стійка до перезавантаження застосунку.

Sync Layer – шар синхронізації. Відповідає за виявлення конфліктів, вибір стратегії злиття, передачу операцій і отримання `remote delta`. Цей рівень єдиний, хто знає про мережу. Заміна транспортного протоколу не зачіпає інші два рівні. Рисунок 1 показує взаємодію між рівнями та повний pipeline від дії користувача до оновлення глобального стану.

Ключова відмінність від традиційних підходів – конфлікт виявляється до передачі на сервер. Це зменшує кількість повторних запитів і знижує `L_sync`. Local Store не знає про мережу. Sync Layer

не знає про UI. Така ізоляція дозволяє замінювати реалізацію кожного рівня незалежно один від одного.

Модель версіонування на основі векторних годинників. Стан кожного запису описується кортежем (`id`, `value`, `vector_clock`, `tombstone`), де `vector_clock` – вектор лічильників виду $\{\text{client\_id: sequence\_number}\}$. Tombstone-прапорець потрібен для логічного видалення: без нього реплікація не може відрізнити «запис не існує» від «запис ще не отримано».

Для двох версій v_1 і v_2 визначаються такі відносини між їхніми векторними годинниками:

$$VC_1 < VC_2 \Leftrightarrow \forall i: VC_1[i] \leq VC_2[i] \wedge \exists j: VC_1[j] < VC_2[j]$$

(версія v_1 є причинним предком v_2 – конфлікту немає)

$$VC_1 \parallel VC_2 \Leftrightarrow \neg(VC_1 \leq VC_2) \wedge \neg(VC_2 \leq VC_1)$$

(версії конкурентні – необхідне злиття)

Конкурентні версії ($VC_1 \parallel VC_2$) неможливо впорядкувати за часом: обидві записані «одночасно»

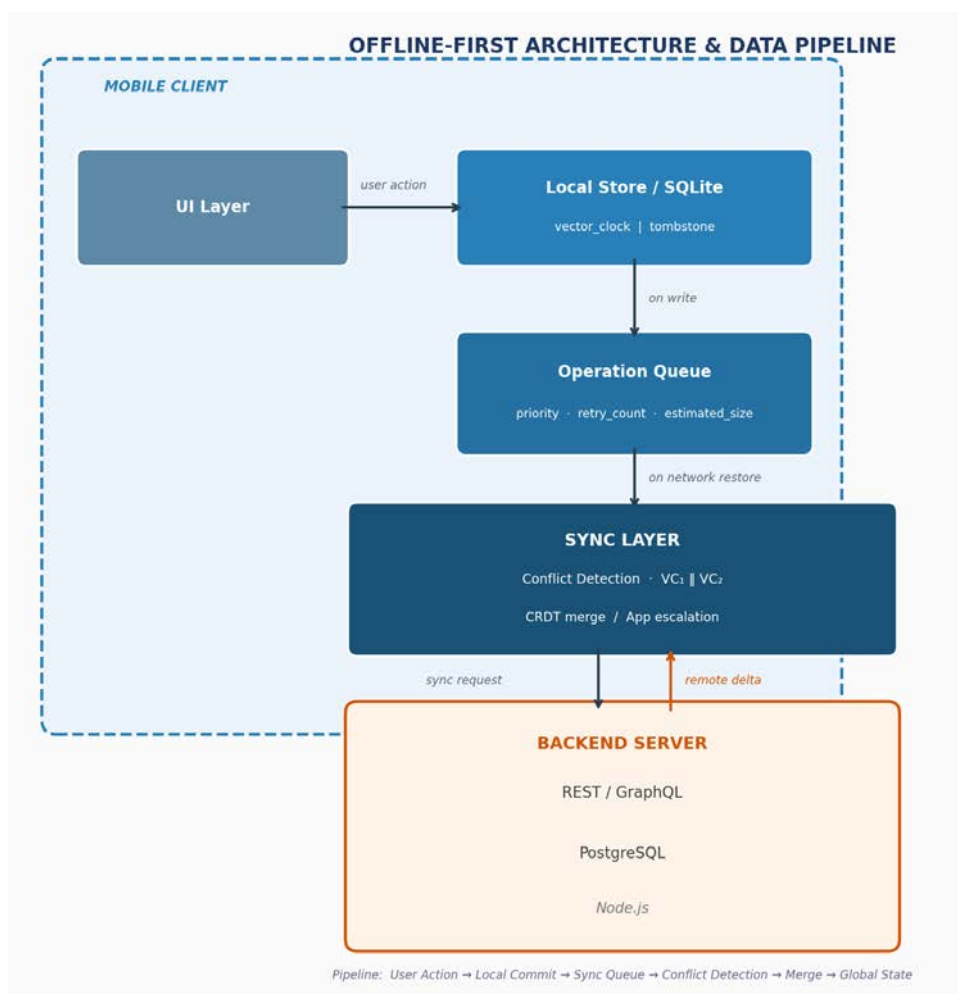


Рис. 1. Архітектура та концептуальна рамка офлайн-першочергового мобільного застосунку

з точки зору причинно-наслідкового порядку. Саме для таких випадків потрібні CRDT або ескалация до застосунку. При відновленні мережі кожен клієнт передає свій вектор разом з операцією. Сервер порівнює вектори і визначає клас відносин.

Практична реалізація: при кожному локальному записі клієнт збільшує свій лічильник у векторі. При отриманні remote delta – оновлює вектор до максимуму покомпонентно. Розмір вектора зростає лінійно з кількістю активних клієнтів, тому для великих систем застосовується компактна версія з видаленням неактивних записів після певного TTL. Серед конкретних підходів – dotted version vectors і interval tree clocks, які дозволяють зберігати причинну інформацію при значно меншому розмірі структури.

CRDT-структури: принципи і практичне застосування. Не всі дані однаково підходять для CRDT. Це важливо розуміти до вибору стратегії. Лічильник переглядів, корзина покупок, список учасників – гарні кандидати. Текстовий документ, що редагується одночасно, – складніший випадок.

G-Counter (grow-only counter) дозволяє лише інкремент. Кожен клієнт зберігає свій лічильник незалежно. Злиття: $\text{merge}(A, B)[i] = \max(A[i], B[i])$. Загальне значення – сума всіх компонент. Простий і передбачуваний.

OR-Set (observed-remove set) – набір з операціями додавання і видалення без конфліктів. Кожен елемент несе унікальний тег при додаванні. Видалення застосовується лише до відомих тегів. Якщо елемент додано і видалено конкурентно – він залишається. Семантика «додавання перемагає» підходить для більшості UX-сценаріїв. Варто враховувати: при тривалому офлайн кількість унікальних тегів може суттєво зрости (tombstone accumulation), що безпосередньо впливає на L_reconciliation. Це одне з обмежень OR-Set у довготривалих офлайн-сценаріях.

LWW-Register (last-write-wins register) вирішується через timestamp. Прийнятний для некритичних полів – аватар, налаштування теми. Але при clock skew між пристроями є ризик втрати реально пізнішої операції. Не підходить для фінансових і медичних даних.

У запропонованій гібридній стратегії: структуровані поля з чіткою семантикою обробляються CRDT. Транзакційні поля ескалюються до рівня застосунку. Результат – 94,7% автоматки без ризику втрати критичних даних.

Математична модель затримки та метрика узгодженості. Продуктивність offline-first системи визначається двома ключовими метриками:

затримкою синхронізації і рівнем автоматичної узгодженості. Оптимізація однієї за рахунок іншої не має практичного сенсу.

Формула 1 – Synchronization Latency Model

$$L_{\text{sync}} = L_{\text{network}} + L_{\text{processing}} + L_{\text{queue}} + L_{\text{conflict}} + L_{\text{reconciliation}}$$

L_{network} – мережева затримка передачі: від 40 мс (Wi-Fi) до 380 мс (3G з втратами). $L_{\text{processing}}$ – час серверної обробки: типово 15–40 мс. L_{queue} – сортування черги, $O(n \log n)$: при $n < 100$ менше 10 мс, при $n > 1000$ – помітний внесок. L_{conflict} – CRDT-злиття, $O(k \times |VC|)$: домінує лише при великій кількості конкурентних конфліктів. $L_{\text{reconciliation}}$ – узгодження локального стану після pull remote delta. Ця складова відсутня у попередніх моделях. При тривалому офлайн ($n > 50$ операцій) досягала 97 мс – більше за L_{conflict} у тому ж сценарії. Формула є верхньою межею (upper bound) затримки: на практиці компоненти можуть частково перекриватися, проте для мобільного клієнта з однопотоковою чергою послідовна модель є коректним наближенням.

Формула 2 – Consistency Ratio Metric

$$C = 1 - (N_{\text{conflicts}} / N_{\text{updates}})$$

$N_{\text{conflicts}}$ – кількість операцій, що потребували будь-якого вирішення конфлікту (автоматичного або ручного). N_{updates} – загальна кількість операцій оновлення. Для більш точного аналізу можна розрізняти: $C_{\text{auto}} = 1 - (N_{\text{auto}} / N_{\text{updates}})$ – частка автоматично вирішених, і C_{total} , що охоплює всі конфлікти включно з ескалованими. $C = 1,0$ означає повну автоматичну узгодженість. $C = 0,947 - 5,3\%$ операцій потребували втручання. $C < 0,90$ – сигнал про системну проблему зі стратегією версіонування. Ці дві формули разом дають повну картину: L_{sync} показує, скільки часу займає синхронізація, C – наскільки вона надійна.

Алгоритм адаптивного управління операційною чергою. Черга операцій визначає порядок і умови передачі змін на сервер. Кожна операція має атрибути priority $\in \{\text{critical, high, normal, background}\}$, retry_count і created_at. Пріоритет встановлюється застосунком: фінансові операції – critical, оновлення профілю – normal, аналітика – background.

```
procedure SyncOnRestore(queue, network_state):
  if network_state == OFFLINE:
    persist_queue_to_disk(queue) // зберегти стан
  return
```

```
for op in sort(queue, priority DESC, created_at ASC):
  if op.retry_count > MAX_RETRY:
    move_to_dead_letter_store(op)
  continue
```

```

result = send_with_exponential_backoff(op)

if result == CONFLICT:
    merged = crdt_merge(op.local, result.server)
    if merged == UNRESOLVABLE: escalate_to_app(op)
    else: apply_local(merged); push_resolved(merged)

elif result == SUCCESS:
    remove_from_queue(op)
    update_vector_clock(op.client_id)

pull_remote_delta(last_sync_token)
C = 1 - (session_conflicts / session_updates)

```

Алгоритм 1. Процедура синхронізації даних у офлайн-першочерговому застосунку

Алгоритм включає три критичних елементи. Dead-letter store – операції, що перевищили MAX_RETRY (рекомендоване значення з досвіду тестування: 3–5 спроб), не видаляються, а зберігаються для подальшого перегляду або ручного підтвердження. При ескаляції (escalate_to_app) операція залишається в черзі зі статусом PENDING_MANUAL до явного підтвердження або відхилення застосунком – це запобігає мовчазній втраті даних. Exponential backoff – інтервал між повторними спробами зростає з кожною помилкою, що знижує навантаження на нестабільну мережу. Pull remote delta наприкінці – гарантує, що клієнт отримає зміни від інших пристроїв, не лише передасть свої. Зауваження щодо обмеження: алгоритм не описує сценарій втрати мережі посеред синхронізації, коли частина операцій вже відправлена, але підтвердження не отримано. У реальних системах це вирішується через idempotency ключі та механізм at-least-once delivery – їх реалізація виходить за межі цієї статті і є напрямом подальшого дослідження.

Експериментальна оцінка.

Для перевірки моделі реалізовано прототип на React Native [21] з WatermelonDB [20] (SQLite) і кастомним Sync Layer. Серверна частина – Node.js із PostgreSQL. Тестування проводилось на трьох пристроях: Samsung Galaxy A53 (Android 13, Snapdragon 778G, 6 GB RAM), Apple iPhone 13 (iOS 16, A15 Bionic, 4 GB RAM) і Xiaomi Redmi Note 11 (Android 12, Snapdragon 680, 4 GB RAM). Для кожного профілю мережі виконано 200 циклів синхронізації. Перевірено чотири профілі мережі: стабільне Wi-Fi з'єднання (baseline), переривчасте з'єднання (втрати пакетів 20–40%), тривалий офлайн-період 5–30 хвилин і конфліктний сценарій – одночасне редагування одного запису з двох пристроїв. Стратегія LWW показала найнижчу L_sync (312 мс на Snapdragon) і не потребує ручного втручання, але ціною 8,3% втрачених операцій. Замість злиття вона просто переписує старішу версію. Для застосунків із транзакційною семантикою це системна вада. Стратегія Vector Clock + ескаляція дала нуль втрат, але лише 81,2% автоматизації: решта потребувала ручного втручання. Гібридна CRDT-стратегія знайшла оптимальний баланс: нуль втрат при 94,7% автоматизації. Firebase Firestore як baseline показав L_sync = 290 мс – найнижчий результат, але C = 0,918 із 7,1% втрат операцій.

Таблиця 1 підсумовує порівняльний аналіз продуктивності на конкретних платформах.

Xiaomi Redmi Note 11 показав найвищу L_sync (418 мс) – на 27% більше, ніж на iPhone. Але C = 0,943 залишився стабільним. Це підтверджує: алгоритм адаптується до ресурсів пристрою. На слабшому обладнанні зростає L_queue і L_reconciliation, але надійність не деградує.

Таблиця 1

Порівняння продуктивності підходів до синхронізації

Платформа / стратегія	L_sync медіана, мс	C (узгодженість)	Втрата операцій	CPU overhead
Samsung A53 – LWW	312	0,917	8,3%	низький
Samsung A53 – CRDT гібрид	350	0,947	0%	середній
iPhone 13 – CRDT гібрид	328	0,951	0%	середній
Xiaomi Redmi Note 11 – CRDT гібрид	418	0,943	0%	середній
Firebase Firestore (baseline)	290	0,918	7,1%	низький

Таблиця 2

Механізми вирішення конфліктів у розподілених мобільних застосунках

Стратегія	Complexity	Ризик втрати даних	Consistency (C)	Рекомендовано для
LWW	O(1)	Високий – 8,3%	0,917	Некритичні поля
CRDT (OR-Set + G-Counter)	O(k× VC)	Відсутній	0,947	Лічильники, набори
Vector Clock + ескаляція	O(k× VC)	Відсутній	C_auto = 0,812	Транзакційні дані
Гібридна CRDT + ескаляція	O(k× VC)	Відсутній	0,947	Загальне призначення

Таблиця 2 аналізує механізми вирішення конфліктів за трьома параметрами – обчислювальна складність, ризик втрати даних і досягнута узгодженість. Ці характеристики визначають, яка стратегія підходить для конкретного типу даних.

LWW підходить лише для некритичних полів, де втрата одного оновлення не має наслідків. Гібридна CRDT-стратегія є оптимальним вибором для загального застосування: вона поєднує автоматизм CRDT там, де це безпечно, і передає контроль застосунку там, де семантика злиття неоднозначна.

Час відгуку системи в умовах мережевої нестабільності.

Рисунок 2 – найважливіший практичний результат цього дослідження. Він показує поведінку системи протягом 60 секунд при нестабільній мережі. Cloud-Only архітектура реагує на кожне погіршення сигналу різкими сплесками до 1800 мс. Offline-First тримає рівний відгук 350–420 мс незалежно від стану з'єднання, бо читання і запис відбуваються локально. Для кінцевого користувача це різниця між «застосунок завис» і «застосунок працює».

Сплески Cloud-Only корелюють із моментами погіршення сигналу. Зауваження: тестування проводилось у контрольованому середовищі з визначеними моментами і рівнем деградації мережі, тому сплески мають відносно регулярний характер. У реальних умовах амплітуда і частота варіюватимуться. Без буферизації на стороні клієнта

кожен запит чекає відповіді мережі. Offline-First не залежить від цих сплесків: локальний запис відбувається одразу, синхронізація – пізніше, коли мережа стабілізується.

Рівень конфліктів залежно від частоти синхронізації. Рисунок 3 відповідає на практичне питання: як часто потрібно синхронізуватися? При інтервалі 1 хвилина LWW показує conflict rate 24% – кожна четверта операція конфліктує. CRDT гібрид при тому ж інтервалі – 10%. Це контрінтуїтивний, але логічний результат: при частій синхронізації збільшується кількість «вікон зіткнення» (collision windows) – проміжків, коли зміна одного клієнта ще не поширилась до іншого, і обидва редагують той самий запис. Рідша синхронізація зменшує кількість таких вікон, бо клієнти довше чекають і отримують більш актуальний стан перед редагуванням. При інтервалі 30–60 хвилин обидві стратегії сходяться до рівня 1–2%. Але LWW продовжує втрачати операції навіть при низькому conflict rate, тоді як CRDT гібрид зберігає нуль втрат незалежно від частоти синхронізації.

Практичний висновок з Рисунку 3: для більшості мобільних застосунків оптимальний інтервал синхронізації – 5–15 хвилин. При ньому CRDT гібрид тримає conflict rate нижче 8% із нульовою втратою операцій. Частіша синхронізація знижує конфлікти, але збільшує витрати батареї і трафіку. Рідша – економна, але при поверненні після тривалого офлайн L_reconciliation зростає суттєво.

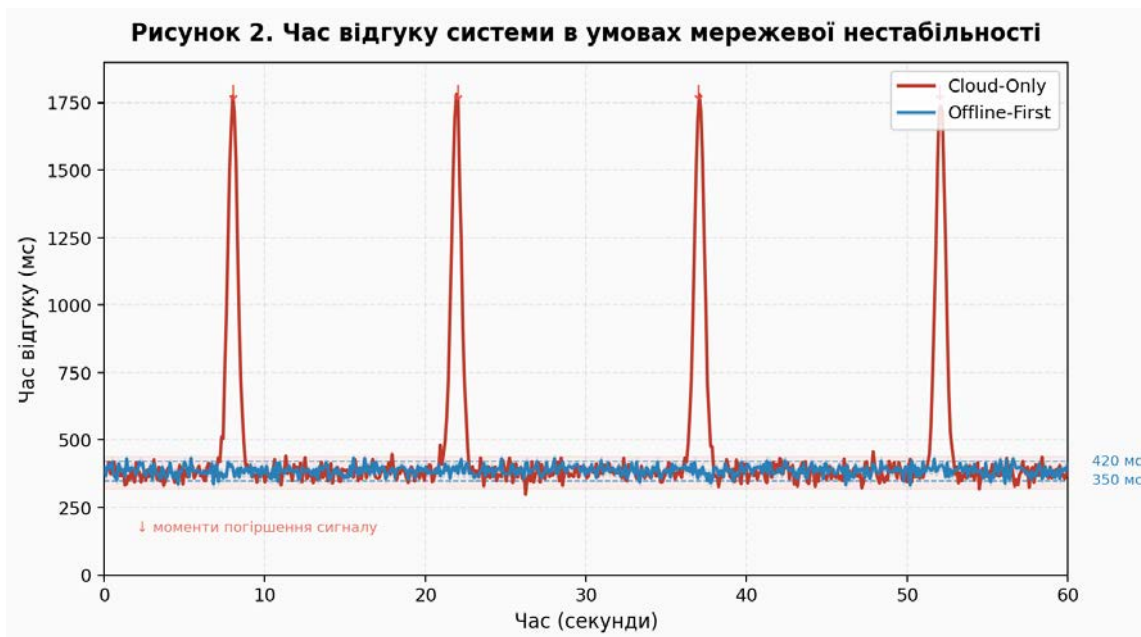


Рис. 2. Час відгуку системи в умовах мережевої нестабільності (60 секунд)

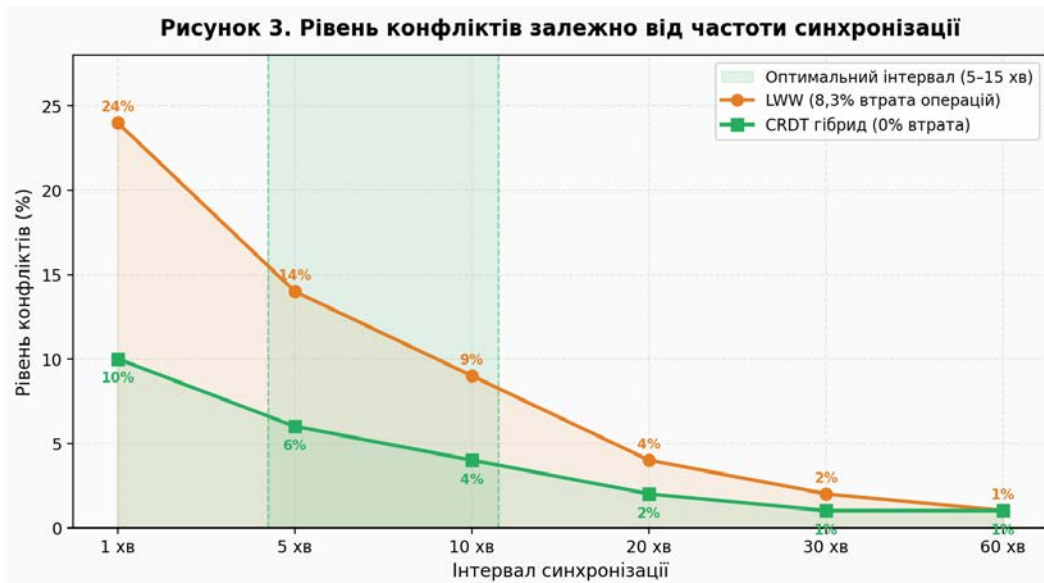


Рис. 3. Рівень конфліктів даних залежно від частоти синхронізації

Аналіз результатів. Таблиці 1 і 2 разом дають повну картину. Таблиця 1 показує реальні цифри продуктивності на конкретних пристроях. Таблиця 2 пояснює, чому результати саме такі: LWW швидкий через $O(1)$ складність, але платить за це втратами. CRDT складніший за обчисленнями, але надійніший.

Найважливіший результат – поведінка при тривалому офлайн. $L\_reconciliation$ після 30+ хвилин офлайну досягала 97 мс. Попередні моделі цю складову ігнорували – і через це недооцінювали реальну L_sync для довгих офлайн-сесій. Для медичних застосунків у польових умовах це критично важлива деталь.

Рисунок 2 показує головний аргумент на користь Offline-First: стабільний UX незалежно від мережі. Cloud-Only при нестабільному з'єднанні показує сплески до 1800 мс. Offline-First тримає 350–420 мс. Різниця у 4–5 разів – це не оптимізація, це інша категорія досвіду.

Рисунок 3 дає практичну рекомендацію щодо частоти синхронізації. Для транзакційних застосунків – кожні 5–10 хвилин з CRDT гібридом. Для аналітичних або довідникових систем – кожні 30–60 хвилин достатньо.

Firebase Firestore показав найнижчу L_sync (290 мс) завдяки хмарній оптимізації. Але 7,1% втрат операцій – неприйнятний рівень для будь-чого серйознішого за соціальні реакції. Запропонована модель поступається Firebase за швидкістю на 21% у кращому випадку (328 мс на iPhone), але повністю усуває втрати і не залежить від Google.

Обмеження дослідження. Модель перевірено на трьох пристроях і прототипі – масштабування до $n > 10^5$ клієнтів потребує окремого дослідження, зокрема компактизації векторних

годинників (dotted version vectors або interval tree clocks). Алгоритм SyncOnRestore не описує повне відновлення після часткової синхронізації (partial sync failure) – це виходить за межі поточної роботи. Прив'язка до WatermelonDB і React Native є особливістю прототипу, але не архітектурним обмеженням моделі.

Висновки. У роботі запропоновано архітектурну модель offline-first мобільного застосунку з трирівневою структурою (Local Store, Operation Queue, Sync Layer), формалізованим механізмом виявлення конфліктів через векторні годинники, CRDT-орієнтованою стратегією злиття з ескалацією, розширеною формулою L_sync із компонентою $L\_reconciliation$ і метрикою узгодженості C .

Тестування на трьох реальних платформах підтвердило три основних результати. По-перше, гібридна CRDT-стратегія забезпечує $C = 0,943\text{--}0,951$ і нульову втрату операцій, тоді як LWW втрачає 8,3%. По-друге, Offline-First архітектура тримає час відгуку 350–420 мс незалежно від стану мережі – Cloud-Only при нестабільному зв'язку показує сплески до 1800 мс. По-третє, компонента $L\_reconciliation$, ігнорована у попередніх моделях, досягає 97 мс при тривалих офлайн-сесіях і є суттєвою для точного прогнозування L_sync .

Запропонована модель не залежить від хмарного провайдера. Вона придатна для медицини, логістики, польової автоматизації – усюди, де мережа є ненадійним ресурсом.

Перспективи подальших досліджень: аналіз поведінки при $n > 10^5$ накопичених операцій; вплив mobile edge computing на компоненту $L\_reconciliation$; розширення моделі на peer-to-peer синхронізацію без центрального сервера.

Список літератури:

1. Brewer E. A. Towards robust distributed systems. Proceedings of the 19th Annual ACM Symposium on Principles of Distributed Computing (PODC). 2000. P. 7. URL: <https://doi.org/10.1145/343477.343502>.
2. Shapiro M., Pregoica N., Baquero C., Zawirski M. Conflict-free Replicated Data Types. Proceedings of SSS 2011. P. 386–400. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-24550-3_29.
3. Vogels W. Eventually consistent. Communications of the ACM. 2009. Vol. 52, No. 1. P. 40–44. URL: <https://doi.org/10.1145/1435417.1435432>.
4. Apache CouchDB / PouchDB Documentation. PouchDB: The JavaScript Database that Syncs. 2023. URL: <https://pouchdb.com/guides/>.
5. Google Firebase. Cloud Firestore Data Model and Offline Persistence. Firebase Documentation. 2024. URL: <https://firebase.google.com/docs/firestore/manage-data/enable-offline>.
6. Amazon Web Services. AWS AppSync: Delta Sync for Offline Support. AWS Documentation. 2023. URL: <https://docs.aws.amazon.com/appsync/latest/devguide/tutorial-delta-sync.html>.
7. Kleppmann M. Designing Data-Intensive Applications. O'Reilly Media. 2017. 616 p.
8. Terry D. B., Theimer M. M., Petersen K. et al. Managing update conflicts in Bayou. Proceedings of the 15th ACM SOSP. 1995. P. 172–182. URL: <https://doi.org/10.1145/224056.224070>.
9. Almeida P. S. Approaches to Conflict-free Replicated Data Types. ACM Computing Surveys. 2024. Vol. 57, No. 2. Article 51. URL: <https://doi.org/10.1145/3695249>.
10. Bailis P., Ghodsi A. Eventual consistency today: limitations, extensions, and beyond. ACM Queue. 2013. Vol. 11, No. 3. P. 20–32. URL: <https://doi.org/10.1145/2460276.2462076>.
11. DeCandia G., Hastorun D., Jampani M. et al. Dynamo: Amazon's highly available key-value store. Proceedings of 21st ACM SOSP. 2007. P. 205–220. URL: <https://doi.org/10.1145/1294261.1294281>.
12. Helland P. Immutability Changes Everything. Proceedings of CIDR. 2015. URL: https://cidrdb.org/cidr2015/Papers/CIDR15_Paper16.pdf.
13. Lakshman A., Malik P. Cassandra: a decentralized structured storage system. ACM SIGOPS Operating Systems Review. 2010. Vol. 44, No. 2. P. 35–40. URL: <https://doi.org/10.1145/1773912.1773922>.
14. Weiss S., Urso P., Molli P. Logoot-Undo: Distributed Collaborative Editing System on P2P Networks. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. 2010. Vol. 21, No. 8. P. 1162–1174. URL: <https://doi.org/10.1109/TPDS.2009.173>.
15. Mattern F. Virtual time and global states of distributed systems. Proceedings of the International Workshop on Parallel and Distributed Algorithms. 1989. P. 215–226.
16. Gray J., Helland P., O'Neil P., Shasha D. The dangers of replication and a solution. Proceedings of ACM SIGMOD. 1996. P. 173–182. URL: <https://doi.org/10.1145/233269.233330>.
17. Brewer E. A. CAP twelve years later: how the rules have changed. IEEE Computer. 2012. Vol. 45, No. 2. P. 23–29. URL: <https://doi.org/10.1109/MC.2012.37>.
18. Kleppmann M., Beresford A. R. A conflict-free replicated JSON datatype. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. 2017. Vol. 28, No. 10. P. 2733–2746. URL: <https://doi.org/10.1109/TPDS.2017.2697382>.
19. Shapiro M., Pregoica N. Designing a commutative replicated data type. INRIA Research Report RR-6320. 2007. URL: <https://hal.inria.fr/inria-00177693>.
20. Nozbe / Pietruszewski R. WatermelonDB: Reactive & asynchronous database for powerful React and React Native apps. GitHub repository. 2023. URL: <https://github.com/Nozbe/WatermelonDB>.
21. Meta Platforms. React Native: A framework for building native apps using React. Official Documentation. 2024. URL: <https://reactnative.dev/docs/getting-started>.

Liushenko A.M. DESIGN AND DATA SYNCHRONIZATION MODELS FOR OFFLINE-FIRST SCALABLE MOBILE APPLICATIONS

There is a whole class of mobile tasks where network connectivity is not a resource but an obstacle. A field medic cannot wait for a signal. A logistics operator in a low-coverage zone cannot either. This paper is about designing systems where offline is the default state, not an emergency fallback. Storing data locally is a solvable problem. The real difficulty appears when two devices have independently edited the same record without any connection between them, and the network finally recovers. Which version is correct? Existing solutions only partially answer this: PouchDB lacks queue prioritization, Firebase Firestore loses 7.1% of operations as a baseline (LWW on Samsung A53 reaches 8.3% – these are different systems), and AppSync is tied to the AWS ecosystem.

The paper proposes a three-layer model consisting of Local Store, Operation Queue, and Sync Layer, where each layer has a single responsibility and no knowledge of its neighbors. Conflicts are detected via vector clocks before any data is sent to the server. Automatic merging relies on CRDT structures – G-Counter, OR-Set, and LWW-Register – while semantically complex conflicts are escalated to the application layer. The synchronization latency formula L_{sync} is extended with a fifth component, $L_{reconciliation}$, which was absent in prior models. During offline sessions longer than 30 minutes it reached 97 ms – more than the CRDT merge itself – making it a significant factor in accurate latency estimation. A consistency metric $C = 1 - (N_{conflicts} / N_{updates})$ is introduced to measure synchronization reliability.

The model was validated on three real devices – Samsung Galaxy A53, Apple iPhone 13, and Xiaomi Redmi Note 11 – with 200 synchronization cycles per network profile. The hybrid CRDT strategy produced zero operation loss with 94.7% automatic conflict resolution and $C = 0.943\text{--}0.951$. Under the same conditions, LWW lost 8.3% of operations. The model is provider-independent and can be deployed on any mobile platform without architectural changes.

Keywords: *offline-first mobile applications, distributed mobile systems, mobile data synchronization, eventual consistency, offline data replication, conflict resolution strategies, mobile distributed data management, scalable mobile architectures.*

Дата першого надходження статті до видання: 27.03.2026
 Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.04.2026
 Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Марченко О.І.

<https://orcid.org/0000-0001-5754-4920>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КІБЕРБЕЗПЕКИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ ЗРОСТАННЯ КІБЕРЗАГРОЗ ЦИФРОВОГО СЕРЕДОВИЩА

Метою дослідження є розробка прикладного підходу до підвищення кіберстійкості інформаційних систем. Поєднано аналітичні моделі з багаторівневими архітектурами захисту та інтелектуальними механізмами виявлення атак. Робота фокусується на взаємозв'язках між параметрами функціонування систем і результативністю захисних заходів. Формалізація процесів оцінювання ризиків забезпечує вибір оптимальних рішень для стабільності інфраструктури. Методологія дослідження об'єднує математичне моделювання, аналіз потокових даних та машинне навчання. Застосовано підходи, що враховують часові характеристики інцидентів і рівень вразливості активів. Аналізуючи навантаження на систему, інтегровано моделі поведінкового аналізу з алгоритмами класифікації. Для перевірки ефективності розробленого підходу використано аналітичні розрахунки та порівняння показників моніторингу. Оцінювання базується на верифікації параметрів стійкості обчислювальних ресурсів. Застосування інтегрованих моделей підвищує точність ідентифікації інцидентів, скорочуючи загальний час реагування. Поєднання розподіленої обробки даних із централізованим аналізом гарантує ефективний контроль стану мережі. Рівень кіберстійкості безпосередньо залежить від узгодженості архітектурних компонентів та аналітичних модулів. Використання інтелектуальних алгоритмів мінімізує кількість помилкових спрацювань під час класифікації загроз. Це дозволяє адміністраторам швидше локалізувати вектори проникнення зловмисників. Практичне значення результатів полягає у впровадженні розроблених механізмів у корпоративні інформаційні системи. Запропоновані рішення адаптуються до змінних умов функціонування та вільно масштабуються у розподілених середовищах. Такі інструменти оптимізують витрати на безпеку, зменшуючи потенційні втрати від кіберінцидентів. Наукова новизна роботи полягає у створенні комплексної аналітичної системи оцінювання стійкості. Розроблена модель інтегрує технічні, поведінкові та економічні параметри захисту. Отримані дані розширюють можливості моделювання процесів захисту для розвитку адаптивних систем безпеки.

Ключові слова: кібербезпека інформаційних систем, кіберризик, кіберстійкість, інтелектуальні системи захисту, SOC-SIEM системи, адаптивні моделі безпеки.

Постановка проблеми. Стабільність функціонування інформаційних систем залежить від ефективності протидії складним кіберзагрозам. Підприємства масштабують цифрову інфраструктуру через хмарні сервіси та API. Такі технологічні зміни розширюють поверхню атак на корпоративні мережі. Мінімізація збитків безпосередньо корелює зі швидкістю реагування на інциденти. Сучасна архітектура безпеки обов'язково містить аналітичні модулі реального часу. Математичне моделювання дозволяє формалізувати оцінювання стійкості обчислювальних ресурсів [1, с. 126]. Інтеграція технічних і поведінкових засобів захисту залишається неузгодженою. Автономне функціонування засобів безпеки заважає швидкій кореляції подій. Відсутність

синхронізації між рівнями оборони збільшує тривалість ідентифікації загроз. Проектування систем захисту вимагає одночасного обчислення багатьох параметрів. Розробники враховують операційне навантаження, показники доступності та фінансові ризики. Створення адаптивних механізмів забезпечить керованість процесів кібербезпеки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У публікації Костюк Ю. В., Складанний П. М., Рзаєва С. Л., Самойленко Ю. О., Коршун Н. В. [2] наведені результати досліджень інтелектуальних систем керування у кіберфізичних середовищах. Показано залежність ефективності захисту від рівня інтеграції аналітичних модулів. Водночас залишаються відкритими питання масштабування



таких рішень у розподілених інформаційних системах. У дослідженні Фесьоха В. С., Субач І. Ю. [5] подано концептуальні підходи до підвищення кіберстійкості інформаційно-комунікаційних систем. Автори визначили основні параметри адаптації систем до змін загроз. Разом із тим недостатньо опрацьовано механізми кількісного оцінювання стійкості при високих навантаженнях.

У науковому баченні від групи Хлапонін Ю. І. та ін. [6] виділено функціональні складові систем захисту критичної інфраструктури. Показано роль структурного розподілу захисних механізмів. Проте не розкрито методи інтеграції цих компонентів у єдину аналітичну систему. У публікації Альджумая О. та ін. [7] проаналізовано ризики інформаційної інфраструктури на основі NIST-підходу. Наведено класифікацію загроз і вразливостей. Однак відсутня деталізація динамічних моделей оцінювання ризику в умовах змінних параметрів системи.

У дослідженні Бератас К. [8] розглянуто процеси виявлення та відновлення після кібератак. Показано важливість багаторівневого підходу до захисту. Разом із цим не вирішено питання оптимізації часу реагування з урахуванням ресурсних обмежень. У науковій публікації Гнатюк С., Побережна З., Заліський М. [9] досліджено взаємозв'язок кібербезпеки та економічної стійкості підприємства. Автори обґрунтували вплив інцидентів на фінансові результати. Водночас потребують уточнення моделі оцінювання непрямих втрат і репутаційних ризиків.

У монографії Гарасимчук О. [10] узагальнено сучасні методи захисту інформації з використанням штучного інтелекту та Blockchain. Визначено напрями інтеграції нових технологій у системи безпеки. Проте залишаються невирішеними питання узгодження цих технологій з існуючими корпоративними архітектурами. У дослідженні Ібаді Н. А. та ін. [12] було запропоновано комплексні стратегії підвищення рівня кіберзахисту інформаційних систем. Показано ефективність поєднання технічних і управлінських підходів. Разом із тим не деталізовано алгоритми адаптації систем до змін інтенсивності атак. Робота Марадова К. та ін. [16] виокремлює використання байєсівських мереж для підтримки рішень у сфері кібербезпеки. Автори продемонстрували можливість прогнозування інцидентів. Водночас потребують розвитку методи інтеграції таких моделей у реальні системи моніторингу.

Постановка завдання. Мета дослідження – запропонувати інтегрований підхід до

забезпечення кіберстійкості для сучасних інформаційних систем.

Задачі дослідження:

- сформувати модель кількісного оцінювання кіберризиків;
- обґрунтувати архітектуру інтегрованої системи кіберзахисту;
- розробити заходи підвищення кіберстійкості інформаційних систем.

Виклад основного матеріалу. Цифрова інфраструктура підприємств змінює структуру ризиків і операційні процеси. Зростає частка розподілених сервісів, мобільних пристроїв і віддалених доступів. Внаслідок цього зростає кількість точок входу для атак. Паралельно збільшується обсяг даних, що циркулюють між системами. Кожен елемент інфраструктури формує окремий вектор загрози. Складність мереж ускладнює контроль доступу і моніторинг подій. Інженери фіксують зміну структури атак за останні роки. Поширюються комбіновані сценарії, що поєднують технічні та поведінкові впливи. Хакери використовують автоматизовані інструменти для сканування вразливостей. Далі вони переходять до етапу експлуатації через слабкі конфігурації. Значна частина інцидентів виникає через помилки доступу або невчасне оновлення систем. Водночас збільшується кількість атак на хмарні сервіси та API [15, с. 38].

Керівники IT-підрозділів фокусуються на підтримці безперервності процесів. Збої в інформаційних системах призводять до втрат доходів і контрактів. Витрати на відновлення після атак часто перевищують інвестиції в захист. У цьому контексті безпека інтегрується в операційні моделі підприємства. Контроль ризиків переходить від періодичних перевірок до постійного моніторингу. З технічної точки зору, структура кібербезпеки складається з кількох рівнів. Кожен рівень виконує окрему функцію контролю і захисту. На рівні мережі реалізуються механізми фільтрації й сегментації. На рівні додатків застосовуються методи контролю доступу і шифрування. На рівні користувачів діють політики автентифікації та поведінкового аналізу. Для оцінки змін у структурі загроз доцільно використовувати кількісні показники [17]. Дані моніторингу дозволяють відстежувати динаміку інцидентів (табл. 1).

Аналіз показує зміщення акценту від традиційних атак до комбінованих сценаріїв. Найшвидше зростають атаки через API та соціальну інженерію. Час виявлення інцидентів залишається значним. Проблематика вразливостей тісно

пов'язана з архітектурою інформаційних систем. Розподілені середовища містять різномірні компоненти. Кожен компонент має власні конфігурації і політики доступу. Відсутність централізованого контролю створює додаткові ризики. Часто вразливості виникають через несумісність версій програмного забезпечення. Значна частина інцидентів пов'язана з людським фактором. Працівники використовують слабкі паролі або повторюють їх у різних системах. Операційні служби впроваджують системи постійного контролю подій. Використовуються SIEM-платформи та системи поведінкової аналітики. Вони збирають журнали подій і виявляють відхилення від нормальної активності [19, с. 128-129]. У таблиці 2 наведено оцінку ефективності методів виявлення загроз.

Результати демонструють перевагу інтелектуальних методів. Вони забезпечують швидшу реакцію і вищу точність. Проте їх впровадження потребує ресурсів і підготовки персоналу. Традиційні методи залишаються базовим рівнем захисту.

Інженерні підходи до захисту інформаційних систем базуються на розподіленій обробці подій. Потoki телеметрії надходять із мережевих пристроїв, серверів і прикладних сервісів. На edge-рівні виконується попередня фільтрація і локальна кореляція інцидентів. Далі агреговані дані передаються у хмарні аналітичні вузли. Така схема знижує затримки обробки та підвищує точність детекції.

Архітектура захисту включає кілька незалежних контурів контролю. Перший контур відпо-

відає за перевірку мережевих з'єднань і сегментацію трафіку. Другий рівень аналізує запити до сервісів і контролює права доступу. Третій контур обробляє поведінкові патерни користувачів. Кожен рівень генерує власні метрики стану безпеки. Взаємодія між контурами здійснюється через централізовану шину подій. Оцінювання ризику виконується через багатофакторну функцію, що враховує динаміку загроз, інтенсивність атак і стан ресурсів [18, с. 217]:

$$R^* = \sum_{i=1}^n \left[\omega_i \left(\sum_{j=1}^m \frac{P_{ij} V_{ij}^2 C_{ij} \ln(1 + E_{ij})}{1 + \exp(-\alpha_{ij} t_{ij})} \right) \cdot \left(1 + \frac{L_i^\gamma}{(L_i^{\max})^\gamma + \varepsilon} \right) \right]. \quad (1)$$

де:

R^* – інтегральний ризик системи;

P_{ij} – ймовірність атаки;

V_{ij} – коефіцієнт вразливості;

C_{ij} – критичність активу;

E_{ij} – очікувані втрати;

α_{ij} – параметр чутливості до часу;

Δt_{ij} – тривалість інциденту;

L_i – навантаження вузла;

γ – показник нелінійності;

ω_i – вага вузла.

Збільшення навантаження підсилює вплив ризику через степеневу функцію. Логарифмічний множник відображає насичення втрат при великих значеннях збитків. У межах SOC-контурів застосовуються алгоритми кореляції подій. Система враховує помилки класифікації та часові затримки реагування. Для оцінки ефективності використовується наступна функція:

Таблиця 1

Динаміка та структура кіберзагроз у цифровому середовищі [3, 10]

Тип загрози	Частка інцидентів, %	Темп зростання, %	Джерело атаки	Середній час виявлення, год.	Рівень критичності
Malware	28	12	Зовнішній	36	Високий
DDoS	19	15	Зовнішній	12	Високий
Phishing	17	22	Людський фактор	48	Середній
Insider threat	11	9	Внутрішній	72	Високий
API attacks	14	18	Зовнішній	24	Високий
Misconfiguration	11	13	Організаційний	60	Середній

Таблиця 2

Порівняльна ефективність методів виявлення кіберінцидентів [11, 16]

Метод	Точність виявлення, %	Час реакції, хв.	Рівень автоматизації	Складність впровадження
Сигнатурний аналіз	72	10	Низький	Низька
Поведінковий аналіз	88	6	Середній	Середня
AI-моделі	93	3	Високий	Висока
SIEM	85	8	Середній	Середня
UEBA	90	5	Високий	Висока
IDS/IPS	80	7	Середній	Середня
Threat intelligence	87	9	Середній	Середня

$$E_{SOC}^* = \frac{\sum_{s=1}^h \eta_s \left(\frac{N_s^{det}}{N_s^{all}} \right) \left(1 - \frac{FP_s^2 + FN_s^2}{(N_s^{all})^2} \right) \cdot \exp(-\rho_s T_s^{resp})}{\sum_{s=1}^h \eta_s} \cdot \left(1 - \frac{C_{op}^{\delta}}{(C_{op}^{max})^{\delta}} \right). \quad (2)$$

де:

E_{SOC}^* – інтегральна ефективність системи моніторингу;

N_s^{det} – виявлені інциденти;

FP_s, FN_s – помилки класифікації;

T_s^{resp} – час реагування;

ρ_s – коефіцієнт штрафу за затримку;

C_{op} – операційні витрати;

δ – коефіцієнт нелінійності витрат.

Експоненційна складова знижує ефективність при збільшенні часу реагування. Квадрати помилок підсилюють їх вплив на загальний показник. Аналіз поведінки користувачів виконується через нормовану багатовимірну функцію відхилення:

$$A_u^* = \sqrt{\sum_{k=1}^p \lambda_k \left(\frac{x_{uk} - \mu_{uk}}{\sigma_{uk}} \right)^4} + \gamma \sum_{r=1}^q \left| \frac{f_{ur} - \hat{f}_{ur}}{\hat{f}_{ur} + \varepsilon} \right|^2. \quad (3)$$

де:

A_u^* – показник аномальності;

x_{uk} – поточні параметри поведінки;

μ_{uk}, σ_{uk} – статистичні характеристики;

λ_k – вагові коефіцієнти;

f_{ur} – фактична частота дій;

$\hat{f}_{ur}$ – прогноз.

Підвищення ступеня у формулі підсилює чутливість до відхилень, що надаватиме швидкості при виявленні нестандартної активності (табл. 3).

Інтеграція компонентів виконується через гібридну модель обробки даних. Edge-вузли виконують локальну фільтрацію і швидке реагування.

Хмарні платформи забезпечують довготривале зберігання і навчання моделей. Така структура підтримує масштабованість системи. Кіберстійкість мережі визначається через комплексний показник:

$$S^* = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \left[\beta_1 \left(\frac{1}{MTTD_i} \right)^{\theta} + \beta_2 \left(\frac{1}{MTTR_i} \right)^{\phi} + \beta_3 U_i^{\psi} + \beta_4 A_i^{\psi} + \beta_5 \left(1 - \frac{R_i}{R_i^{max}} \right)^{\zeta} \right]}{\sum_{i=1}^n \omega_i}. \quad (4)$$

де:

S^* – інтегральна кіберстійкість;

$MTTD_i, MTTR_i$ – часові параметри;

U_i – надійність;

A_i – доступність;

$\theta, \phi, \psi, \zeta$ – параметри нелінійності.

Показник зменшується при зростанні часу реагування або ризику. Збільшення надійності та доступності підвищує стійкість системи (табл. 4).

Оптимізація архітектури виконується через мінімізацію сукупних витрат і ризиків:

$$J^* = \min \left\{ \sum_{r=1}^z C_r x_r + \phi \sum_{i=1}^n R_i(x) + \psi \sum_{i=1}^n \frac{T_i^{det}(x) + T_i^{resp}(x)}{T_i^{crit}} - \chi \sum_{i=1}^n S_i(x) \right\}. \quad (5)$$

де:

x_r – змінні вибору механізмів захисту;

C_r – витрати;

$R_i(x)$ – ризик;

T_i^{det}, T_i^{resp} – часові параметри;

$S_i(x)$ – стійкість.

Модель буде враховувати баланс між витратами і рівнем захисту. Підбір параметрів виконується з урахуванням обмежень ресурсів і вимог безпеки. Організації перебудовують кіберза-

Таблиця 3

Технічні параметри функціонування модулів кіберзахисту

Модуль	Частота обробки, подій/с	Затримка, мс	Точність, %	Навантаження CPU, %	Коефіцієнт помилок
SIEM ядро	15000	120	91	68	0,08
UEBA модуль	9000	95	94	72	0,05
IDS/IPS	12000	110	88	65	0,12
AI детектор	8000	70	96	78	0,04
Log collector	20000	50	85	55	0,15
Correlation engine	11000	130	92	74	0,07
Edge analyzer	6000	40	89	48	0,10
Cloud processor	14000	150	95	82	0,06

Таблиця 4

Аналітична оцінка кіберстійкості корпоративної мережі

Вузол	MTTD, хв	MTTR, хв	Рівень ризику	Доступність	Індекс стійкості
Сервер 1	15	40	0,32	0,96	0,71
Сервер 2	12	35	0,28	0,97	0,76
DB вузол	20	55	0,41	0,94	0,63
API шлюз	10	30	0,25	0,98	0,81
Edge вузол	8	25	0,22	0,99	0,85
Cloud кластер	18	45	0,30	0,97	0,74

хист через поєднання управлінських і технічних рішень. Політики доступу узгоджуються з архітектурою сервісів і структурою даних. Кожен бізнес-процес отримує власний профіль ризику. Для цього використовуються журнали подій, фінансові показники та метрики доступності. Паралельно формується карта критичних активів з прив'язкою до інфраструктури (рис. 1).

Під час формування кіберстратегії застосовується багатокритеріальна оцінка стану системи [14]. Розрахунок інтегрує відповідність стандартам, технічний рівень захисту та управлінські фактори:

$$G^{sec} = \sum_{i=1}^n \omega_i \left[\frac{C_i^{std} \cdot K_i^{ctrl} \cdot A_i^{proc}}{1 + \exp(-\alpha_i t_i)} + \frac{L_i^{comp}}{L_i^{max} + \varepsilon} \right]. \quad (6)$$

де:

G^{sec} – інтегральний показник зрілості кіберстратегії;

C_i^{std} – рівень відповідності стандартам;

K_i^{ctrl} – ефективність контрольних механізмів;

A_i^{proc} – узгодженість із бізнес-процесами;

L_i^{comp} – рівень комплаєнсу;

t_i – тривалість функціонування системи;

ω_i – вага компонента.

Функція враховує динаміку розвитку системи та ступінь інтеграції політик безпеки. Операційні підрозділи виконують управління ризиками через циклічну модель. Вона включає виявлення загроз, їх кількісну оцінку та вибір заходів реагування. Для розрахунку оптимального сценарію використовується залежність виду:

$$R^{opt} = \min \left\{ \sum_{j=1}^m (P_j \cdot D_j \cdot \ln(1 + \tau_j)) - \sum_{k=1}^p (E_k \cdot S_k^\beta) \right\}. \quad (7)$$

де:

R^{opt} – оптимізований рівень ризику;

P_j – ймовірність інциденту;

D_j – величина втрат;

τ_j – тривалість інциденту;

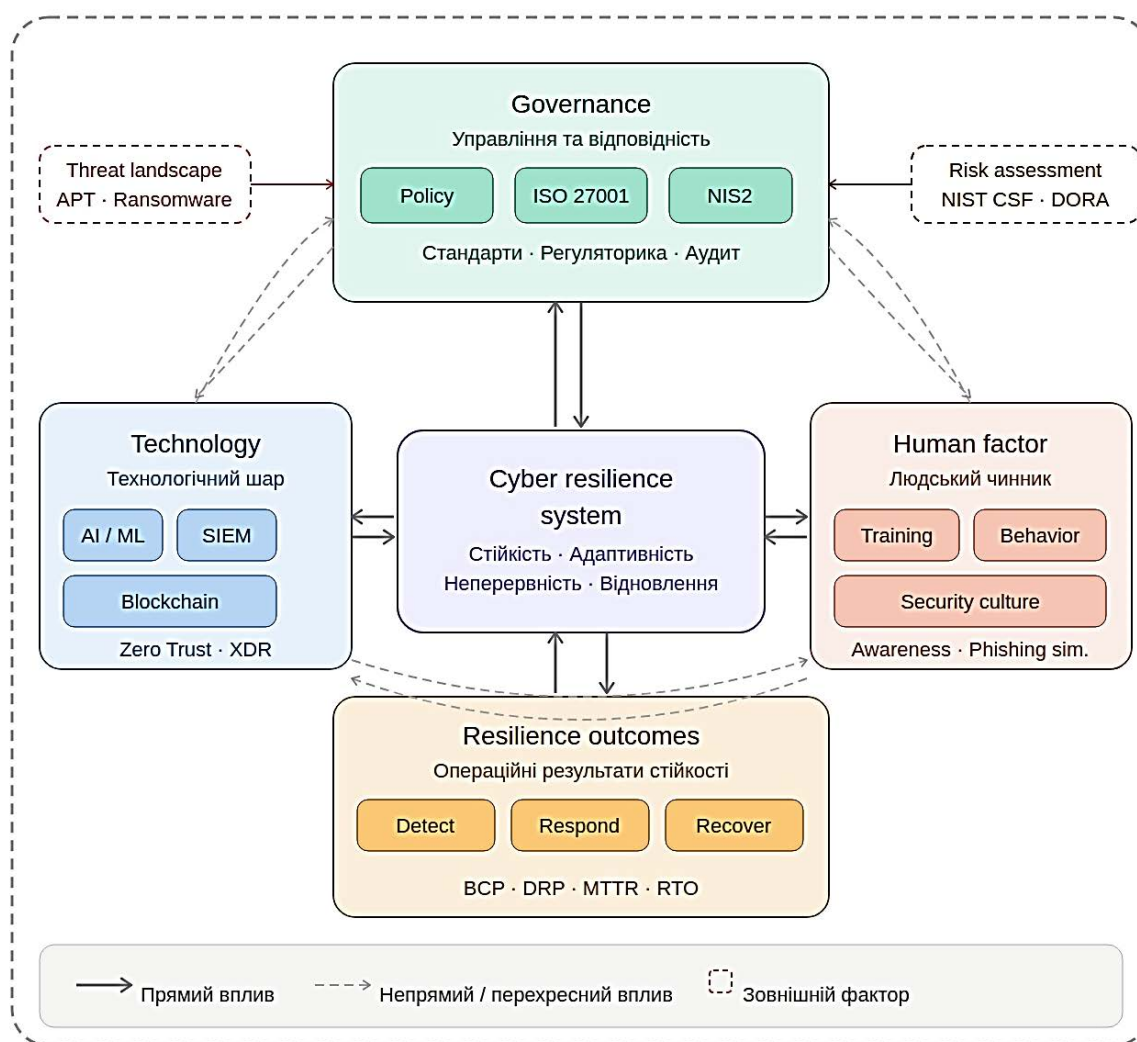


Рис. 1. Інтегрована модель кіберстійкої інформаційної системи (розроблено автором в середовищі SolidWorks)

E_k – ефективність заходів захисту;
 S_k – рівень покриття системи захистом;
 β – коефіцієнт впливу заходів.

Модель враховує одночасно втрати і ефективність захисних механізмів. Інтелектуальні системи детекції атак використовують комбіновані алгоритми. Вони інтегрують нейронні мережі та статистичні моделі. Обробка даних виконується у режимі потокового аналізу. Для визначення рівня загрози формується новий показник:

$$T^{AI} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \left[\left(\frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2 + \gamma_i \left(\frac{f_i - \bar{f}_i}{\bar{f}_i + \varepsilon} \right)^2 \right] \cdot \exp(-\delta_i t). \quad (8)$$

де:

T^{AI} – рівень загрози;

x_i – поточні параметри системи;

μ_i, σ_i – статистичні характеристики;

$\bar{f}_i, f_i$ – фактичні і прогнозовані значення;

δ_i – коефіцієнт затухання.

Показник реагує на відхилення та зменшується при стабілізації системи. Інженерна реалізація механізмів захисту потребує узгодження технологій із параметрами навантаження, затримок

і точності детекції. Вибір рішень здійснюється з урахуванням частоти оновлення, рівня ризику та вартості впровадження. В таблиці 5 подано систематизовані пропозиції щодо інтеграції компонентів кіберзахисту в корпоративну інфраструктуру з характеристиками їхньої ефективності.

Захист даних доповнюється технологіями розподіленого зберігання. Blockchain використовується для фіксації подій і забезпечення незмінності записів. Кожен блок містить хеш попереднього стану системи. Це унеможливує приховане редагування журналів. Цифрові двійники систем безпеки застосовуються для моделювання атак. Вони відтворюють структуру мережі та поведінку сервісів. Під час симуляції система тестує різні сценарії загроз [13]. Результати використовуються для оптимізації конфігурацій. Вплив людського фактора враховується через поведінкові індекси. Для оцінки ризику користувачів вводимо таку функцію:

$$H^{risk} = \sum_{u=1}^k \theta_u \left[\frac{A_u^{anom}}{A_u^{max}} + \frac{E_u^{err}}{E_u^{tot}} \right] \cdot (1 + \ln(1 + t_u)). \quad (9)$$

де:

H^{risk} – ризик; пов'язаний з користувачами;

Таблиця 5

Пропозиції щодо впровадження механізмів кіберзахисту в корпоративних системах (сформовано автором)

Компонент	Тип технології	Частота оновлення	Рівень ризику	Вартість впровадження	Очікуваний ефект	Пріоритет
SIEM	Аналітика подій	5 хв	Високий	Висока	Зниження інцидентів	1
AI детектор	ML	1 хв	Високий	Висока	Рання детекція	1
Blockchain логуювання	Розподілені системи	10 хв	Середній	Середня	Цілісність даних	2
Zero Trust	Контроль доступу	Постійно	Високий	Середня	Обмеження доступу	1
SOC центр	Моніторинг	24/7	Високий	Висока	Швидке реагування	1
Edge аналіз	Локальна обробка	30 сек	Середній	Середня	Зменшення затримок	2
Threat intelligence	Дані загроз	1 год	Середній	Низька	Прогнозування атак	3

Таблиця 6

Пропозиції щодо підвищення кіберстійкості інформаційних систем (сформовано автором)

Захід	Тип впливу	Частота реалізації	Зменшення ризику	Витрати	Час впровадження	Результат
Навчання персоналу	Організаційний	1 раз/квартал	18%	Низькі	2 тижні	Зниження помилок
Оновлення ПЗ	Технічний	1 раз/місяць	25%	Середні	1 тиждень	Закриття вразливостей
Впровадження AI	Технічний	Постійно	32%	Високі	2 місяці	Рання детекція
Zero Trust	Архітектурний	Постійно	28%	Середні	1 місяць	Контроль доступу
SOC розширення	Організаційний	Постійно	30%	Високі	3 місяці	Швидке реагування
Blockchain	Технічний	Постійно	20%	Середні	2 місяці	Захист даних
Edge інтеграція	Технічний	Постійно	22%	Середні	1 місяць	Зменшення затримок
Аудит безпеки	Контрольний	2 рази/рік	15%	Низькі	3 тижні	Виявлення проблем

A_u^{anom} – кількість аномалій;

E_u^{err} – кількість помилок;

t_u – тривалість активності.

Зростання активності без контролю підвищує значення ризику. Підвищення кіберстійкості досягається через поєднання організаційних і технічних заходів, що впливають на ризик, час реагування та стабільність сервісів [4, с. 10]. Оцінювання ефекту потребує кількісного порівняння витрат і результатів впровадження. У таблиці 6 наведено структуровані пропозиції щодо оптимізації системи захисту з урахуванням частоти реалізації та очікуваних змін показників.

Завершальний етап передбачає оптимізацію всієї системи кіберзахисту. Для цього використовується багатокритеріальна функція:

$$J^{final} = \min \left\{ \sum_{r=1}^z C_r x_r + \phi \sum_{i=1}^n R_i + \psi \sum_{i=1}^n \frac{T_i^{det} + T_i^{resp}}{T_i^{crit}} - \chi \sum_{i=1}^n S_i \right\}. \quad (10)$$

де:

J^{final} – інтегральний критерій оптимізації;

C_r – витрати;

R_i – ризик;

T_i^{det} , T_i^{resp} – часові параметри;

S_i – стійкість системи.

Оптимізація виконується з урахуванням ресурсних обмежень. Система змінює конфігурації у відповідь на нові загрози. Такий підхід буде забезпечувати адаптивність і стабільність функціонування певної інформаційної інфраструктури.

Висновки. Дослідження підтвердило залежність кіберстійкості від узгодженості архітектурних і аналітичних компонентів захисту. Поєднання багаторівневого контролю доступу з потоковою обробкою подій скорочує час виявлення інцидентів. Застосовуючи нелінійні моделі оцінювання ризику, розробники точніше враховують динаміку загроз. Розподілена обробка даних підвищує ефективність моніторингу, одночасно знижуючи навантаження на центральні вузли.

Аналіз довів ефективність інтелектуальних алгоритмів у виявленні відхилень поведінки користувачів. Використання адаптивних моделей на основі статистичних методів зменшує кількість хибних спрацювань. Точність класифікації інцидентів зростає завдяки комбінуванню різних джерел даних. Інтеграція поведінкового аналізу в контури безпеки сприяє ранньому виявленню аномалій. Стабільність функціонування інформаційних систем прямо залежить від впровадження таких інструментів.

Отримані результати підтвердили доцільність використання комплексних критеріїв оптимізації кіберзахисту. Врахування витрат і часу реагування забезпечує прийняття збалансованих управлінських рішень. Запропоновані підходи адаптують конфігурації захисту до змін структури атак. Практичне застосування розроблених моделей підвищує надійність функціонування цифрової інфраструктури. Параметри залишкового ризику визначають кінцеву конфігурацію засобів протидії загрозам.

Список літератури:

1. Єсіна М. В., Логачова Є. О., Колованова Є. В. Дослідження та порівняння нормативних регуляторних документів Європейського Союзу у сфері кібербезпеки. *Computer Science and Cybersecurity*. 2025. № 1 (27). С. 123-131. DOI: <https://doi.org/10.26565/2519-2310-2025-1-05>
2. Костюк Ю. В., Складанний П. М., Рзаєва С. Л., Самойленко Ю. О., Коршун Н. В. Інтелектуальні системи керування та захисту в кіберфізичних і хмарних середовищах Smart Grid. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. 2025. № 2 (30). С. 125-156. DOI: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.30.956>
3. Ларін С. В. Захист інформації в системі кібербезпеки як стратегічний пріоритет реалізації державних механізмів захисту національних цінностей в Україні. *Публічне управління та регіональний розвиток*. 2025. № 27. С. 278-294. DOI: <https://doi.org/10.34132/pard2025.27.12>
4. Македон В. В., Волошко Н. О. Вплив транснаціональних корпорацій на реалізацію цілей сталого розвитку. *Інфраструктура ринку*. 2023. Вип. 70. 2023. С. 8-14. DOI: <https://doi.org/10.32782/infrastructure70-2>
5. Фесьоха В. С., Субач І. Ю. Концептуальна основа підвищення кіберстійкості інформаційно-комунікаційних систем в умовах еволюції кіберзагроз. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. 2025. № 4 (28). С. 511-528. DOI: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.28.856>
6. Хлапонін Ю. І., Козубцова Л. М., Козубцов І. М., Штонда Р. В. Функції системи захисту інформації і кібербезпеки критичної інформаційної інфраструктури. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. 2022. № 3 (15). С. 124-134. DOI: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2022.15.1241341>
7. Aljumaiah O., Jiang W., Reddy Addula S., Almaiah M. A. Analyzing cybersecurity risks and threats in IT infrastructure based on NIST framework. *Journal of Cyber Security and Risk Auditing*. 2025. Vol. 2025. No 2. pp. 12-26. DOI: <https://doi.org/10.63180/jcsra.thestap.2025.2.2>
8. Beretas C. Information systems security, detection and recovery from cyber attacks. *Universal Library of Engineering Technology*. 2024. Vol. 1. No 1. pp. 27-40. DOI: <https://doi.org/10.70315/uloap.ulete.2024.0101005>
9. Gnatyuk S., Poberezhna Z., Zaliskyi M. Information security and protection from cyber attacks as a component of the economic security system of the enterprise. *CEUR Workshop Proceedings*. 2025. Vol. 4042. pp. 180-192.

10. Harasymchuk O. (Ed.) *Modern methods of ensuring information protection in cybersecurity systems using artificial intelligence and Blockchain technology: collective monograph*. Kharkiv: TECHNOLOGY CENTER PC. 2025. 132 p. DOI: <http://doi.org/10.15587/978-617-8360-12-2>
11. Hossain A., Islam M. T., Chowdhury B. R., Olajide A. O., Sani A. I., Hossain K., Sinha K. P., Altemimi M. A. H., Al Mamun M. A. Advancements in cybersecurity for managements information systems. *Membrane Technology*. 2024. Vol. 2024. No 6. pp. 16-16. DOI: <https://doi.org/10.52710/mt.271>
12. Ibadi N. A., Ibrahim S. K., Najem W. M., Hadi T. H. Innovative strategies for enhancing cybersecurity in information systems: a holistic approach in computer engineering. *Journal of Information Systems Engineering and Management*. 2025. Vol. 10. No 35s. pp. 826-839. DOI: <https://doi.org/10.52783/jisem.v10i35s.6151>
13. Kamariotou M., Kitsios F. Information systems strategy and security policy: a conceptual framework. *Electronics*. 2023. Vol. 12. No 2. pp. 1-12. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12020382>
14. KPMG International. *Cybersecurity considerations 2025*. 2025. 44 p. URL: <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmgsites/cn/pdf/en/2025/04/cybersecurity-considerations-2025.pdf>
15. Makedon V., Koptilyi D. Digital transformation and artificial intelligence as factors in the economic recovery of enterprises following armed conflicts. *Economics, Entrepreneurship, Management*. 2025. Vol. 12. No 1. pp. 33-48. DOI: <https://doi.org/10.56318/eem2025.01.033>
16. Maradova K., Blecha P., Samelova V., Marada T., Zuth D. Bayesian networks for cybersecurity decision support: enhancing human-machine interaction in technical systems. *Applied Sciences*. 2026. Vol. 16. No 6. pp. 3053-3053. DOI: <https://doi.org/10.3390/app16063053>
17. Olzak T. Top ten cybersecurity concerns in 2026 and how to manage them. *LinkedIn/ResearchGate*. 2026. 13 p. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16877.45288>
18. Panteli N., Nthubu B. R., Mersinas K. Being responsible in cybersecurity: a multi-layered perspective. *Information Systems Frontiers*. 2026. Vol. 28. pp. 209-227. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10796-025-10588-0>
19. Ramskyi I., Drozd A., Lyhun O., Ponochohna O. System for cybersecurity evaluation of corporate networks. *Computer Systems and Information Technologies*. 2025. No 2. pp. 123-131. DOI: <https://doi.org/10.31891/csit-2025-2-14>

Marchenko O.I. ENSURING CYBERSECURITY OF INFORMATION SYSTEMS UNDER THE CONDITIONS OF INCREASING CYBER THREATS IN THE DIGITAL ENVIRONMENT

The purpose of the study is to develop an applied approach to enhancing the cyber resilience of information systems. The approach combines analytical models with multi-layered security architectures and intelligent attack detection mechanisms. The work focuses on the relationships between system performance parameters and the effectiveness of protective measures. Formalization of risk assessment processes ensures the selection of optimal solutions for infrastructure stability. The research methodology integrates mathematical modeling, streaming data analysis, and machine learning. The authors applied approaches that account for temporal characteristics of incidents and the vulnerability level of assets. By analyzing system load, behavioral analysis models were integrated with classification algorithms. Analytical calculations and comparison of monitoring indicators were used to validate the effectiveness of the proposed approach. The evaluation is based on verifying the resilience parameters of computational resources.

The application of integrated models increases the accuracy of incident identification while reducing overall response time. The combination of distributed data processing with centralized analytics ensures effective monitoring of network conditions. The level of cyber resilience directly depends on the consistency between architectural components and analytical modules. The use of intelligent algorithms minimizes false positives in threat classification. This enables administrators to localize intrusion vectors more rapidly. The practical significance of the results lies in implementing the proposed mechanisms within corporate information systems. The developed solutions adapt to changing operating conditions and scale efficiently in distributed environments. These tools optimize security costs and reduce potential losses from cyber incidents. The scientific novelty of the study consists in the development of a comprehensive analytical framework for resilience assessment. The proposed model integrates technical, behavioral, and economic parameters of protection. The obtained results extend the capabilities of modeling security processes and support the development of adaptive security systems.

Keywords: information systems cybersecurity, cyber risk, cyber resilience, intelligent security systems, SOC-SIEM systems, adaptive security models.

Дата першого надходження статті до видання: 25.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Медведєв Д.Г.

<https://orcid.org/0000-0002-3747-1717>

Державний університет економіки і технологій

Хоцькіна В.Б.

<https://orcid.org/0000-0001-8963-4189>

Державний університет економіки і технологій

Лисункін Д.Д.

<https://orcid.org/0009-0004-9515-3380>

Державний університет економіки і технологій

ДЕТЕКЦІЯ ФЕЙКОВИХ НОВИН З ВИКОРИСТАННЯМ NLP ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ЇЇ РЕЗУЛЬТАТІВ

Сучасний інформаційний простір характеризується стрімким зростанням обсягів цифрового контенту та високою швидкістю його поширення через мережу Інтернет і соціальні медіа. У таких умовах значно зростає ризик розповсюдження недостовірної інформації, зокрема фейкових новин, які можуть впливати на суспільну думку, політичні процеси, економічну ситуацію та інформаційну безпеку держави. Виявлення та протидія дезінформації є актуальною науково-практичною задачею, що потребує застосування сучасних методів обробки даних.

У даній статті розглянуто підхід до створення програмного забезпечення для автоматичної детекції фейкових новин із використанням методів обробки природної мови (NLP) та машинного навчання. Запропонована система базується на модульній архітектурі, що включає етапи попередньої обробки тексту, векторизації даних за допомогою TF-IDF, класифікації текстів із використанням алгоритму логістичної регресії та подальшої візуалізації результатів із застосуванням методу головних компонент (PCA).

У статті детально описано процес підготовки текстових даних, включаючи очищення, токенизацію та видалення стоп-слів. Особливу увагу приділено перетворенню тексту у числове представлення, що дозволяє ефективно застосовувати алгоритми машинного навчання. Проведено експериментальне дослідження на корпусі новинних текстів, яке показало, що запропонований підхід забезпечує точність класифікації понад 85 %.

Результати дослідження підтверджують ефективність використання класичних методів машинного навчання для задачі детекції фейкових новин. Запропоноване програмне забезпечення може бути використане у системах моніторингу інформаційного простору, новинних агрегаторах та дослідницьких проєктах. Також визначено перспективи розвитку системи, зокрема використання трансформерних моделей та інтеграція додаткових джерел даних.

Ключові слова: фейкові новини, машинне навчання, NLP, класифікація текстів, TF-IDF, логістична регресія.

Постановка проблеми. Поширення фейкових новин є однією з ключових проблем сучасного цифрового суспільства. Завдяки соціальним мережам та онлайн-платформам інформація розповсюджується миттєво, що значно ускладнює її перевірку. Внаслідок цього користувачі можуть отримувати недостовірні або маніпулятивні повідомлення, які впливають на їхні рішення та поведінку.

Автоматизація процесу перевірки достовірності новин дозволяє мінімізувати вплив людського фактора та підвищити ефективність ана-

лізу великих обсягів текстових даних. Для цього застосовуються методи машинного навчання, що здатні визначати закономірності в текстах та класифікувати їх за визначеними категоріями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існуючі підходи до виявлення фейкових новин можна поділити на кілька основних груп: лінгвістичні, статистичні та методи машинного навчання [4].

Лінгвістичні підходи базуються на аналізі стилістичних, синтаксичних та семантичних характеристик тексту. Зокрема, досліджуються емоційна

забарвленість, використання оціночної лексики, частота займенників та інші мовні ознаки, характерні для маніпулятивного контенту [1]. Однак такі методи мають обмеження через залежність від мови та предметної області.

Статистичні методи передбачають використання кількісних характеристик тексту, таких як частота слів, довжина речень та інші метрики. Вони є відносно простими у реалізації, але не враховують глибинний контекст повідомлення [5].

Сучасні дослідження приділяють значну увагу методам машинного навчання, таким як наївний байєсівський класифікатор, метод опорних векторів, логістична регресія та ансамблеві методи [2]. Вони дозволяють досягати високої точності за умови наявності якісно розмічених даних.

Останнім часом особливу популярність набули глибокі нейронні мережі та трансформерні моделі, такі як BERT, які здатні враховувати контекст слів у реченні та значно підвищують якість класифікації [4]. Також досліджуються підходи, що враховують соціальні сигнали, метадані та поведінкові характеристики користувачів.

Таким чином, сучасні дослідження демонструють перехід від простих статистичних методів до складних гібридних моделей, що поєднують NLP, машинне навчання та аналіз контексту [3].

Постановка завдання. Метою даного дослідження є розробка програмного забезпечення для автоматичної детекції фейкових новин із використанням методів обробки природної мови та машинного навчання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Проаналізувати існуючі підходи до класифікації текстових даних.
2. Реалізувати модуль попередньої обробки текстової інформації.
3. Виконати перетворення текстів у числове представлення.
4. Реалізувати алгоритм класифікації на основі машинного навчання.
5. Забезпечити можливість візуалізації результатів класифікації.
6. Провести експериментальну перевірку ефективності системи.

Виклад основного матеріалу. Архітектура програмного забезпечення. Розроблене програмне забезпечення має модульну структуру, що забезпечує гнучкість та можливість подальшого розширення функціоналу.

Загальна архітектура системи представлена на рис. 1.

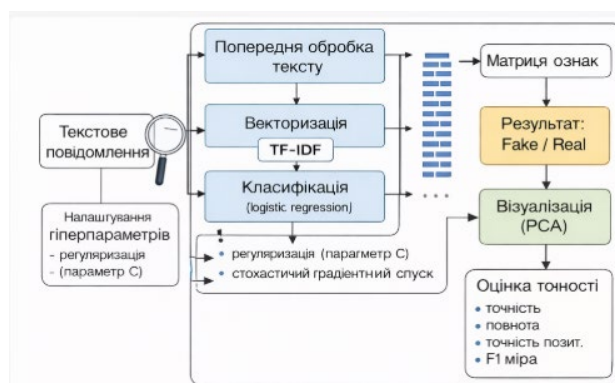


Рис. 1. Архітектура програмного забезпечення для детекції фейкових новин

Система складається з таких основних модулів:

- модуль попередньої обробки тексту;
- модуль векторизації;
- модуль класифікації;
- модуль візуалізації результатів.

Модуль попередньої обробки тексту. Попередня обробка тексту є важливим етапом підготовки даних для подальшого аналізу. Вона дозволяє зменшити шум у даних та підвищити якість навчання моделі.

До основних етапів попередньої обробки належать:

- перетворення тексту до нижнього регістру;
- видалення спеціальних символів;
- видалення стоп-слів;
- токенізація;
- лематизація (за потреби).

Після виконання цих операцій текст стає придатним для подальшого перетворення у числове представлення.

Модуль векторизації. Для перетворення текстових даних у числову форму використовується метод TF-IDF (Term Frequency – Inverse Document Frequency).

Метод TF-IDF дозволяє оцінити важливість кожного слова у тексті відносно всього корпусу документів. Значення TF-IDF визначається як добуток двох показників:

TF – частота терміна в документі;

IDF – обернена частота документа.

Формально:

$$\text{TF-IDF}(t, d) = \text{TF}(t, d) \times \text{IDF}(t)$$

де: t – термін;

d – документ.

Використання TF-IDF дозволяє виділити найбільш інформативні слова та зменшити вплив поширених термінів.

Модуль класифікації. Для класифікації текстів використано алгоритм логістичної регресії. Даний метод є одним із базових алгоритмів бінарної класифікації та забезпечує достатньо високу точність при невеликих обчислювальних витратах.

Логістична регресія оцінює ймовірність належності тексту до одного з класів — «fake» або «real». Функція прийняття рішення базується на сигмоїдній функції:

$$P(y=1|x) = 1 / (1 + e^{-z})$$

де z — лінійна комбінація ознак.

Перевагами даного методу є:

- інтерпретованість результатів;
- швидкість навчання;
- стійкість до перенавчання при достатній кількості даних.

Модуль візуалізації. Для підвищення наочності результатів класифікації реалізовано модуль візуалізації з використанням методу головних компонент (PCA).

Метод PCA дозволяє зменшити розмірність простору ознак та відобразити дані у двовимірному або тривимірному просторі.

Результат роботи модуля візуалізації представлено на рис. 2 та рис. 3.



Рис. 2. Блок-схема алгоритму детекції фейкових новин

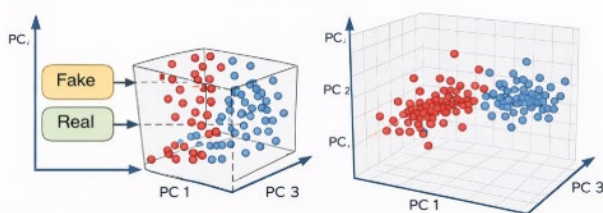


Рис. 3. Візуалізація результатів класифікації після зниження розмірності

Візуалізація дозволяє оцінити розподіл текстів у просторі ознак та проаналізувати якість розділення класів.

Реалізація програмного забезпечення. Розроблене програмне забезпечення реалізовано мовою програмування Python із використанням сучасних бібліотек для обробки текстових даних, машин-

ного навчання та комп'ютерної графіки. Основним інструментом для побудови моделі класифікації було обрано бібліотеку Scikit-learn, яка надає зручні засоби для векторизації тексту, навчання моделей та оцінювання їхньої ефективності.

Для попередньої обробки текстових даних використовуються стандартні методи очищення тексту, зокрема видалення HTML-тегів, спеціальних символів, посилань та приведення тексту до нижнього регістру. Після цього виконується токенізація тексту та видалення стоп-слів, що дозволяє зменшити кількість несуттєвих ознак.

Перетворення текстових даних у числове представлення здійснюється за допомогою методу TF-IDF. У результаті кожен текст представлений у вигляді вектору ознак, що характеризує важливість окремих слів у документі.

Для класифікації текстів використовується алгоритм логістичної регресії. Навчена модель дозволяє визначити ймовірність того, що текст належить до класу «fake» або «real». Після навчання модель зберігається у вигляді файлу та може бути використана для аналізу нових текстових повідомлень.

Для візуалізації результатів класифікації використовується метод зниження розмірності PCA. Отримані координати документів у двовимірному або тривимірному просторі передаються до модуля візуалізації, який реалізовано з використанням бібліотек ModernGL та GLFW. Це дозволяє відображати результати класифікації у вигляді точок у просторі, де кожна точка відповідає окремому тексту новини.

Експериментальні результати. Для оцінки ефективності розробленого програмного забезпечення було проведено експериментальні дослідження на корпусі новинних текстів, що містив повідомлення двох категорій: достовірні новини (real) та фейкові новини (fake).

Перед навчанням моделі дані було розділено на навчальну та тестову вибірки у співвідношенні 80 % до 20 %. Навчальна вибірка використовувалася для побудови моделі логістичної регресії, а тестова — для оцінювання якості класифікації.

Оцінювання проводилося за такими метриками:

- точність (accuracy);
- повнота (recall);
- точність позитивних передбачень (precision);
- F1-міра.

Отримані результати свідчать про достатньо високу ефективність застосованого підходу. Значення точності класифікації перевищує 0,85, що

підтверджує доцільність використання методу TF-IDF у поєднанні з логістичною регресією для задачі детекції фейкових новин.

Аналіз матриці помилок показав, що більшість хибних спрацювань виникає у випадках текстів зі змішаними ознаками або нейтральним стилем викладення. Це свідчить про необхідність подальшого вдосконалення моделі шляхом використання більш складних методів обробки контексту.

Приклад роботи системи. Для демонстрації ефективності розробленого програмного забезпечення було проведено тестування системи на реальних текстових повідомленнях. Метою експерименту було перевірити здатність моделі коректно визначати достовірність новинних повідомлень.

Розглянемо приклад обробки новинного тексту системою.

Приклад 1.

Новина: “Nasa confirms discovery of water traces on Mars based on new satellite data.”

Після виконання етапів попередньої обробки тексту та векторизації за допомогою методу TF-IDF модель класифікації виконала аналіз повідомлення. У результаті система визначила новину як достовірну.

Результат класифікації: Real (достовірна новина).

Отриманий результат пояснюється тим, що текст має нейтральний стиль викладення, містить посилання на наукові джерела та не має ознак емоційної маніпуляції.

Приклад 2.

Новина: “Scientists proved that drinking coffee cures all diseases instantly.”

Після обробки тексту системою було отримано наступний результат:

Результат класифікації: Fake (фейкова новина).

Алгоритм визначив новину як фейкову через використання перебільшених тверджень, відсутність посилань на наукові джерела та наявність маніпулятивних формулювань. Такі лінгвістичні особливості є характерними для дезінформаційних повідомлень.

Отримані результати демонструють, що запропонований підхід дозволяє ефективно визначати фейкові новини на основі аналізу текстових характеристик. Використання методів машинного навчання разом із попередньою обробкою тексту забезпечує достатній рівень точності для практичного застосування системи.

Аналіз результатів роботи системи. Проведені експериментальні дослідження показали, що запропонована система здатна ефективно

виконувати класифікацію новинних повідомлень на достовірні та фейкові. Використання методу TF-IDF дозволяє виділяти ключові слова та фрази, які характерні для різних типів новин.

Аналіз результатів класифікації показав, що модель демонструє стабільні результати при роботі з текстами різної тематики. Найбільш точні результати отримуються для текстів, які мають яскраво виражені лінгвістичні ознаки маніпуляції, зокрема емоційно забарвлену лексику, перебільшені твердження або відсутність джерел інформації.

У процесі експериментів було встановлено, що деякі помилки класифікації виникають у випадках, коли текст містить змішані ознаки або нейтральний стиль викладення. Наприклад, новини з наукової тематики або короткі інформаційні повідомлення можуть мати подібну структуру, що ускладнює їх класифікацію.

Незважаючи на це, результати дослідження підтверджують ефективність використання класичних методів машинного навчання для задачі детекції фейкових новин. Поєднання попередньої обробки тексту, TF-IDF векторизації та логістичної регресії забезпечує достатній рівень точності для практичного використання системи.

Порівняльний аналіз методів. Для підтвердження ефективності обраного підходу було проведено порівняльний аналіз із альтернативними алгоритмами класифікації, зокрема:

- найвним байєсівським класифікатором;
- методом опорних векторів;
- k-найближчих сусідів.

Результати експериментів показали, що логістична регресія забезпечує збалансоване співвідношення між точністю та швидкістю. Метод опорних векторів продемонстрував дещо вищу точність, однак потребує більших обчислювальних ресурсів. Найвним байєсівський класифікатор характеризується високою швидкістю роботи, проте має нижчу точність при роботі з великим словниковим простором.

Таким чином, логістична регресія є оптимальним вибором для реалізації програмного забезпечення з урахуванням обмежень ресурсів та вимог до швидкодії.

Практичне застосування системи. Розроблене програмне забезпечення може бути використане:

- у системах моніторингу інформаційного простору;
- у новинних агрегаторах;
- у дослідницьких проєктах з аналізу медіа-контенту;

– у навчальному процесі для демонстрації методів NLP.

Завдяки модульній архітектурі система може бути розширена шляхом інтеграції нейронних мереж або попередньо навчених мовних моделей.

Перспективи розвитку системи. Розроблена система детекції фейкових новин може бути вдосконалена у кількох напрямках, що дозволить підвищити точність класифікації та розширити функціональні можливості програмного забезпечення.

Одним із перспективних напрямів є використання більш складних моделей обробки природної мови, зокрема нейронних мереж та трансформерних архітектур. Сучасні моделі, такі як BERT або DistilBERT, здатні враховувати контекст слів у реченні та аналізувати складні семантичні залежності між ними. Це дозволяє більш ефективно визначати маніпулятивні або недостовірні повідомлення, які можуть бути складними для класифікації за допомогою класичних статистичних методів.

Іншим напрямом розвитку є інтеграція додаткових джерел інформації для аналізу новин. Наприклад, система може враховувати метадані повідомлень, такі як джерело новини, дата публікації або кількість поширень у соціальних мережах. Аналіз таких характеристик може допомогти більш точно оцінювати достовірність інформації.

Також перспективним є розширення можливостей модуля візуалізації. У поточній версії системи результати класифікації відображаються у вигляді точок у двовимірному або тривимірному просторі після зниження розмірності. У подальшому можна реалізувати більш інтерактивні інструменти аналізу, зокрема динамічні фільтри, підсвічування кластерів або можливість детального перегляду текстів, що знаходяться у певних областях простору ознак.

Крім того, система може бути інтегрована з веб-платформами або новинними агрегаторами для автоматичного аналізу новин у режимі реального часу. Такий підхід дозволить використовувати розроблене програмне забезпечення для моніторингу інформаційного простору та швидкого виявлення потенційно недостовірних повідомлень.

Таким чином, подальший розвиток системи може бути спрямований на підвищення точності алгоритмів, розширення функціональності програмного забезпечення та інтеграцію з сучасними інформаційними платформами. Це дозволить зро-

бити систему більш ефективним інструментом для аналізу новинних повідомлень та боротьби з поширенням дезінформації.

Висновки. У результаті виконаної роботи було розроблено програмне забезпечення для автоматичної детекції фейкових новин із використанням методів обробки природної мови та машинного навчання.

Основні результати роботи:

1. Встановлено, що для автономної детекції найефективнішим є поєднання статистичного аналізу тексту (TF-IDF) та лінійних класифікаторів. Сформульовано вимоги до швидкодії та інтерпретованості системи.

2. Розроблено клас TextPreprocessor, який виконує очищення від HTML-тегів та URL, нормалізацію, токенизацію та фільтрацію стоп-слів. Забезпечено параметризацію під українську, англійську та російську мови.

3. Створено пайплайн на основі векторизації TF-IDF (з використанням уніграм та біграм) та логістичної регресії з балансуванням класів. Модель забезпечує високу точність класифікації та підтримує збереження ваг для подальшого використання.

4. Розроблено консольний застосунок для виконання повного циклу роботи з системою: підготовки даних (preprocess), навчання моделі (train), оцінювання метрик (eval) та прогнозування (predict).

5. Програмно реалізовано алгоритм перетворення багатовимірних векторів текстів у 2D або 3D простір за допомогою методу головних компонент (PCA). Це дозволило сформувати набір метаданих (координати, клас, впевненість) для візуалізації.

6. Розроблено інтерактивний застосунок на основі бібліотек ModernGL та GLFW. Система дозволяє відображати тисячі новин у вигляді точок у 3D-просторі, фільтрувати їх за класами («fake»/«real») та аналізувати розподіл даних.

7. Створено віконний застосунок на базі Tkinter для зручного введення тексту новин, миттєвого отримання результату класифікації з індикатором впевненості та запуску візуалізації.

Отримані результати підтверджують можливість використання класичних алгоритмів машинного навчання для задачі детекції фейкових новин. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на інтеграцію глибоких нейронних мереж та розширення функціоналу системи.

Список літератури:

1. Jurafsky D., Martin J. Speech and Language Processing. Pearson, 2023.
2. Bishop C. Pattern Recognition and Machine Learning. Springer, 2006.
3. Pedregosa F. et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 2011.
4. Zhou X., Zafarani R. Fake News Detection: A Survey. *ACM Computing Surveys*, 2020.
5. Aggarwal C. Machine Learning for Text. Springer, 2018.
6. Devlin J. et al. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers. 2019.
7. Mikolov T. et al. Efficient Estimation of Word Representations. 2013.
8. Manning C., Schütze H. Foundations of Statistical NLP. MIT Press, 1999.
9. Goldberg Y. Neural Network Methods in NLP. 2017.
10. Shu K. et al. Fake News Detection on Social Media. *SIGKDD*, 2017.

Medvediev D.H., Khotskina V.B., Lysunkin D.D. FAKE NEWS DETECTION USING NLP AND VISUALIZATION OF ITS RESULTS

The modern information space is characterized by a rapid increase in the volume of digital content and the high speed at which it spreads via the Internet and social media. Under such conditions, the risk of spreading misinformation—particularly fake news—significantly increases, as this can influence public opinion, political processes, the economic situation, and national information security. Detecting and countering disinformation is a pressing scientific and practical challenge that requires the application of modern data processing methods.

This paper presents an approach to developing software for the automatic detection of fake news using natural language processing (NLP) and machine learning methods. The proposed system is based on a modular architecture that includes stages of text preprocessing, data vectorization using TF-IDF, text classification using a logistic regression algorithm, and subsequent visualization of results using the principal component analysis (PCA) method.

The paper describes in detail the process of preparing text data, including cleaning, tokenization, and stop-word removal. Particular attention is paid to converting text into a numerical representation, which allows for the effective application of machine learning algorithms. An experimental study was conducted on a corpus of news texts, which showed that the proposed approach achieves a classification accuracy of over 85%.

The results of the study confirm the effectiveness of classical machine learning methods for fake news detection tasks. The developed software can be applied in information monitoring systems, news aggregators, and research projects. Future work includes the use of transformer-based models and the integration of additional data sources.

Keywords: Fake news, machine learning, natural language processing, text classification, TF-IDF, logistic regression.

Дата першого надходження статті до видання: 22.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Миронюк Ф.Ю.

<https://orcid.org/0009-0009-3303-7989>

Національний університет «Одеська політехніка»

Беглов К.В.

<https://orcid.org/0000-0002-5277-2577>

Національний університет «Одеська політехніка»

Зима І.В.

<https://orcid.org/0009-0009-8745-8543>

Національний університет «Одеська політехніка»

КЕРУВАННЯ РОЗПОДІЛОМ ПОТУЖНОСТІ В ГІБРИДНІЙ ЕНЕРГЕТИЧНІЙ УСТАНОВЦІ ІЗ СОНЯЧНОЮ, ВІТРОВОЮ ТА АКУМУЛЯТОРНОЮ ПІДСИСТЕМАМИ

У статті запропоновано дискретну математичну модель і покроковий алгоритм керування розподілом потужності між сонячною, вітровою та акумуляторною підсистемами гібридної енергетичної установки, що працює за заданим диспетчерським графіком відпуску електроенергії. Модель охоплює баланс потужності, дискретну динаміку стану заряду акумуляторної батареї, обмеження на заряд і розряд, режими скидання надлишкової генерації та дефіциту, а також формалізацію фактичної видачі потужності в мережу. Алгоритм побудовано як прозору покрокову правилу процедуру диспетчеризації. Ключовою координатою прийняття рішень у ньому виступає залишкова потужність: за її знаком та величиною визначається пріоритет прямого використання сонячної й вітрової генерації, заряд акумуляторної батареї в разі надлишку або її розряд для покриття дефіциту в межах фізичних обмежень. Якість керування оцінювали за інтегральним дефіцитом енергії, скиданням надлишку, середньою абсолютною похибкою, коефіцієнтом відстеження, часом перебування на межах стану заряду, кількістю перемикачів режимів і кількістю перевищень порогової швидкості зміни видачі. Числове моделювання виконано для базового добового сценарію, а також для параметричних, аварійних і чутливих варіантів. Показано, що наявність акумуляторної батареї зменшує інтегральний дефіцит порівняно з конфігурацією без накопичувача. Збільшення енергетичної ємності акумуляторної батареї дає помітніший ефект, ніж нарощування лише меж миттєвої потужності заряду та розряду. Підвищення початкового стану заряду акумуляторної батареї від 0.20 до 0.90 поліпшує якість відстеження заданого графіка та зменшує інтегральний дефіцит енергії. Роботу орієнтовано на відтворюване інженерне сценарне моделювання гібридних сонячно-вітрових установок з акумуляторним накопиченням без використання прогнозного шару.

Ключові слова: гібридна енергетична установка, сонячна генерація, вітрова генерація, акумуляторне накопичення енергії, розподіл потужності, алгоритм керування, математична модель, сценарне моделювання.

Постановка проблеми. Гібридні енергетичні установки, в яких поєднано фотоелектричні, вітрові та акумуляторні підсистеми, нині розглядають як один із базових форматів побудови розподілених джерел енергії з керованою видачею потужності. Для таких систем важлива не тільки сама генерація з відновлюваних джерел. Не менш суттєвою є здатність утримувати заданий графік відпуску електроенергії за мінливої інсоляції,

змінної швидкості вітру та за наявних обмежень накопичувача [1, с. 821–835; 2, с. 1446–1467].

У прикладній постановці ця задача зводиться до того, як розподілити доступну потужність між виконанням диспетчерського завдання, зарядом акумулятора, його розрядом і, за потреби, обмеженням надлишкової генерації. Якщо не враховувати межі SOC, допустимі потужності заряду/розряду та ККД акумуляторної батареї (АКБ), оцінка

працездатності системи виявляється завищеною, а частина керуючих дій – нереалізовною.

Отже, потрібні така модель і такий алгоритм керування, які без прогнозного шару відтворюють покрокову логіку розподілу потужності, коректно тримають енергетичний баланс, поважають обмеження АКБ і дають змогу кількісно оцінити досягнути якість відстеження диспетчерського графіка для різних конфігурацій установки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах з енергоменеджменту гібридних енергосистем найчастіше простежуються три класи підходів: правилі алгоритми з фіксованими пріоритетами джерел, оптимізаційні методи та прогнозно-орієнтовані або інтелектуальні схеми. Правильні алгоритми цінюють за інтерпретованість і відносну простоту промислового впровадження, однак вони не завжди забезпечують найкраще значення обраного критерію. Оптимізаційні та MPC-підходи, навпаки, зазвичай дають вищу якість керування, проте вимагають більшої обчислювальної складності й наявності прогнозованої інформації [1, с. 826–833; 3, с. 615–625; 5, арт. 105483]. У роботі Dali M., Belhadj J., Roboam X. [4, с. 2587–2595] акцентовано експериментальну перевірку, тоді як [6, арт. 32039; 7, арт. 33342] представляють smart-control і метаевристичні схеми керування.

Для систем типу «ФЕС – ВЕС – АКБ» у літературі детально описано моделі акумуляторних накопичувачів, мережевий і автономний режими роботи, а також різні способи компенсації дефіциту та поглинання надлишку енергії. Проте в значній частині публікацій або переважає оптимізаційна постановка без прозорого покрокового алгоритму режимного керування, або, навпаки, наводиться загальна архітектура без чіткої формалізації балансу потужності й обмежень АКБ.

Таким чином, затребуваною залишається модель середнього рівня деталізації: достатньо проста для швидкого сценарного моделювання, але не спрощена до втрати фізичного змісту. Вона має поєднувати енергетичний баланс, динаміку SOC, явні обмеження заряду/розряду та прозору логіку перемикавання режимів. Саме в цьому й полягає науково-практичний внесок роботи – у формалізації відтворюваної дискретної моделі для системи «ФЕС – ВЕС – АКБ» без використання прогнозного шару.

Постановка завдання. Мета статті – розробити математичну модель та алгоритм керування розподілом потужності між сонячною, вітровою й акумуляторною підсистемами гібридної енергетичної установки, здатними забезпечувати керовану видачу потужності за заданим диспетчерським гра-

фіком. Для її досягнення потрібно: формалізувати систему змінних і параметрів; записати баланс потужності та модель SOC; описати режими заряду / розряду АКБ, обмеження надлишку й дефіциту електроенергії; реалізувати покрокову процедуру диспетчеризації; виконати числове моделювання різних сценаріїв роботи, а саме: базового, параметричних, аварійних і чутливих; оцінити результати за системою показників якості.

Виклад основного матеріалу дослідження. Математичну модель системи розглянуто на рівні активної потужності; реактивну складову, гармоніки, детальні перехідні процеси силової електроніки та деградацію батареї в першому наближенні не враховано. У роботі прийнято дискретний час моделювання із кроком Δt . На кожному кроці алгоритм оперує доступною потужністю сонячної та вітрової підсистем, заданою потужністю видачі в мережу, поточним станом заряду акумуляторної батареї та технічними обмеженнями накопичувача.

Під станом заряду акумуляторної батареї (*State of Charge, SOC*) далі розуміємо відносний запас енергії в акумуляторі, тобто відношення поточного запасу енергії до номінальної енергоємності батареї. У розрахунках цей показник змінюється в межах від 0 до 1.

Математична модель керування розподілом потужності. У подальшому викладі модель подано у вигляді системи співвідношень, що включає баланс потужності, рівняння оновлення стану заряду акумуляторної батареї, технічні обмеження на заряд і розряд, а також правило формування фактичної видачі потужності в мережу.

Для числового дослідження прийнято базовий набір параметрів сценарного моделювання, наведений у табл. 1.

Систему співвідношень математичної моделі подано нижче.

$$P_{pv}(k) + P_w(k) + P_{dis}(k) - P_{ch}(k) - P_{spill}(k) + P_{def}(k) = P_{set}(k), \quad (1)$$

де $P_{spill}(k) \geq 0$ позначає вимушене обмеження надлишкової потужності,

$P_{def}(k) \geq 0$ – дефіцит потужності, допустимий лише в дефіцитному режимі.

Тоді фактичну видачу потужності в мережу можна подати так:

$$P_{out}(k) = P_{pv}(k) + P_w(k) + P_{dis}(k) - P_{ch}(k) - P_{spill}(k).$$

Динаміка стану заряду акумуляторної батареї у дискретному часі визначається співвідношенням:

$$SOC(k+1) = SOC(k) + [\eta_{ch} \cdot P_{ch}(k) - P_{dis}(k)/\eta_{dis}] \cdot \Delta t / E_{bat,nom} \quad (2)$$

За обмежень:

$$SOC_{\min} \leq SOC(k) \leq SOC_{\max},$$

$$0 \leq P_{ch}(k) \leq P_{ch,\max},$$

$$0 \leq P_{dis}(k) \leq P_{dis,\max}.$$

Одночасний заряд і розряд акумуляторної батареї в межах одного кроку дискретизації не допускаються:

$$P_{ch}(k) \cdot P_{dis}(k) = 0.$$

Таблиця 1

**Базовий набір сценарних параметрів
математичної моделі для моделювання
в MATLAB R2021a**

Параметр (символ)	Значення, од.	Примітка
Крок дискретизації (Δt)	60 с	Модель похвилинна
Тривалість сценарію (Tsim)	24 год	Добовий профіль
Номинальна потужність ФЕС ($P_{pv,nom}$)	120 кВт	Гранична доступна потужність ФЕС
Номинальна потужність ВЕС ($P_{w,nom}$)	80 кВт	Гранична доступна потужність ВЕС
Номинальна енергоємність АКБ ($E_{bat,nom}$)	240 кВт·год	Корисна енергія уточнюється через межі SOC
Макс. потужність заряду АКБ ($P_{ch,max}$)	60 кВт	Обмеження перетворювача / АКБ
Макс. потужність розряду АКБ ($P_{dis,max}$)	60 кВт	Обмеження перетворювача / АКБ
ККД заряду АКБ (η_{ch})	0.95	Середнє припущення
ККД розряду АКБ (η_{dis})	0.95	Середнє припущення
Мінімальний SOC ($SOC_{\min}$)	0.20 в.о.	Захист від глибокого розряду
Максимальний SOC ($SOC_{\max}$)	0.90 в.о.	Запас зверху
Початковий SOC (SOC_0)	0.50 в.о.	Середній заряд на старті
Базове диспетчерське завдання ($P_{set,base}$)	100 кВт	Середній рівень видачі
Допустиме короткочасне підвищення завдання ($\Delta P_{set, emg}$)	+10 %	Сценарій аварійного запиту від мережі
Обмеження швидкості зміни видачі (R_{max})	15 кВт/хв	Порогове значення для оцінки ramp violations

Алгоритм керування розподілом потужності. Нижче подано словесний покроковий алгоритм, який реалізує запропоновану математичну модель.

Алгоритм 1. Вхідними даними на k-му кроці є доступні потужності сонячної та вітрової підсистем, задане диспетчерське значення потужності, поточний стан заряду акумуляторної батареї та встановлені технічні обмеження накопичувача.

Крок 1. Обчислити сумарну доступну потужність відновлюваних підсистем і визначити залишкову потужність як різницю між заданим графіком відпуску та доступною генерацією. Знак залишкової потужності визначає режим роботи алгоритму.

Крок 2. Якщо залишкова потужність є додатною, система працює в дефіцитному режимі. Алгоритм формує команду на розряд акумуляторної батареї в межах максимально допустимої потужності розряду та доступного запасу енергії. Якщо навіть після цього покрити дефіцит неможливо, фіксується непокритий дефіцит потужності.

Крок 3. Якщо залишкова потужність є від'ємною, система працює в режимі надлишку генерації. Алгоритм спрямовує надлишок на заряд акумуляторної батареї в межах максимально допустимої потужності заряду та вільної енергоємності. Якщо заряд уже неможливий, фіксується вимушене скидання надлишкової потужності.

Крок 4. Якщо залишкова потужність дорівнює нулю, алгоритм не формує команд ані на заряд, ані на розряд, а система залишається у нейтральному режимі без дефіциту та без скидання надлишку.

Крок 5. Після вибору режиму обчислюються фактична видача потужності в мережу, нове значення стану заряду акумуляторної батареї та службові показники режиму роботи. Далі здійснюється перехід до наступного кроку дискретизації.

Крок 6. Повторювати описану послідовність дій для всіх часових кроків сценарію до завершення розрахунку. Отже, алгоритм є скінченною, чіткою та відтворюваною процедурою розподілу потужності для режимів нейтральної роботи, заряду, скидання надлишку, розряду та дефіциту.

Наведена покрокова процедура безпосередньо реалізує запропоновану математичну модель і забезпечує формування керувальних дій для режимів N, C, S, D та F на кожному кроці дискретизації.

Ефективність алгоритму оцінюється за показниками інтегрального дефіциту енергії, скидання надлишку, енергії заряду та розряду, середньої абсолютної похибки, максимальної похибки, коефіцієнта відстеження, тривалості перебування на межах стану заряду, кількості перемикачів режимів і кількості перевищень порогової швидкості зміни видачі. Далі використано такі означення:

$$MAE = (1/N) \sum_{k=1}^N |P_{set}(k) - P_{out}(k)|;$$

$$K_{track} = (E_{out} / E_{set}) \cdot 100 \%;$$

$$N_{sw} = \sum_{k=1}^N I\{m(k) \neq m(k-1)\};$$

$$N_{ramp} = \sum_{k=1}^N I\{|(P_{out}(k) - P_{out}(k-1))/\Delta t| > R_{max}\}.$$

де N – кількість кроків дискретизації,
 $m(k)$ – режим роботи алгоритму,
 $I\{\cdot\}$ – індикатор події.

Моделювання проведено для базового добового сценарію S0 із синтетичними, але фізично правдоподібними профілями $P_{pv,av}(t)$, $P_{w,av}(t)$ та $P_{set}(t)$. Окремо розглянуто параметричні, аварійні й чутливісні сценарії.

Щоб попередньо оцінити сценарій S0 без акумуляторної підсистеми, виконано порівняння профілів сумарної доступної потужності ВДЕ та диспетчерського завдання. На рис. 1–4 подано профілі $P_{pv,av}(t)$, $P_{w,av}(t)$, $P_{set}(t)$ і залишкової потужності $r(t) = P_{set}(t) - (P_{pv,av}(t) + P_{w,av}(t))$. Із графіків видно тривалі дефіцитні інтервали в нічні та вечірні години і лише локальні надлишки вдень.

Попередній розрахунок без АКБ дав такі значення: $E_{def,ideal} = 912.00$ кВт·год; $E_{excess} = 124.55$ кВт·год; максимальний миттєвий дефіцит потужності – 89.28 кВт; максимальний миттєвий надлишок потужності – 61.93 кВт. Співвідношення $E_{def,ideal} / E_{excess} \approx 7.32$ показує, що навіть ідеальний накопичувач без обмежень потужності та без втрат на ККД не зміг би повністю перекрити добовий дефіцит лише за рахунок внутрішнього перерозподілу надлишку.

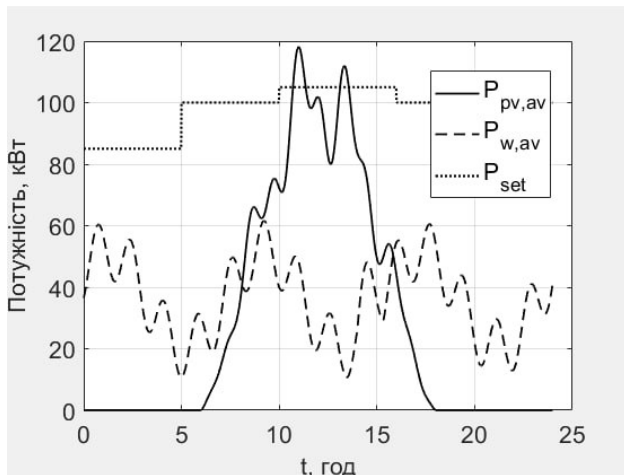


Рис. 1. Доступна потужність фотоелектричної та вітрової підсистем і диспетчерське завдання у базовому сценарії S0

Для конфігурації ФЕС + ВЕС + АКБ диспетчерське моделювання виконано на тому самому профілі S0. На рис. 5–8 наведено диспетчерське завдання, сумарну доступну ВДЕ-потужність, фактичну видачу $P_{out}(t)$, потоки заряду й роз-

ряду, дефіцит і скидання надлишку, профіль SOC, а також послідовність режимів роботи алгоритму.

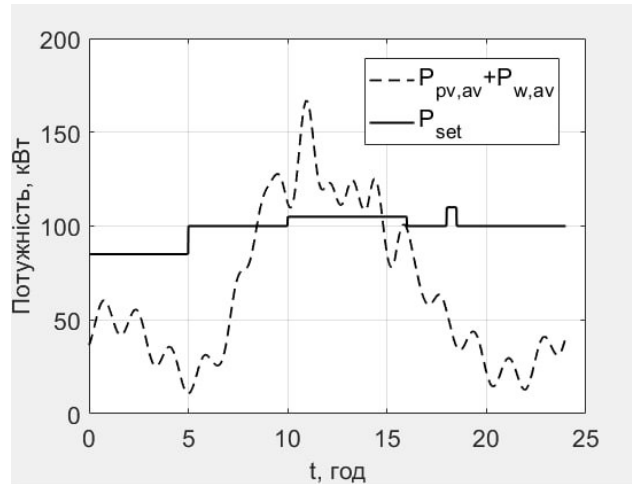


Рис. 2. Сумарна доступна потужність відновлюваних підсистем та диспетчерське завдання у базовому сценарії S0

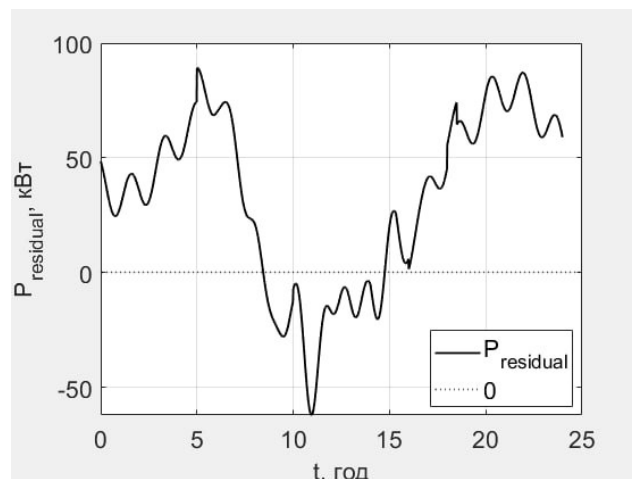


Рис. 3. Залишкова потужність $r(t) = P_{set}(t) - (P_{pv,av}(t) + P_{w,av}(t))$ у базовому сценарії S0

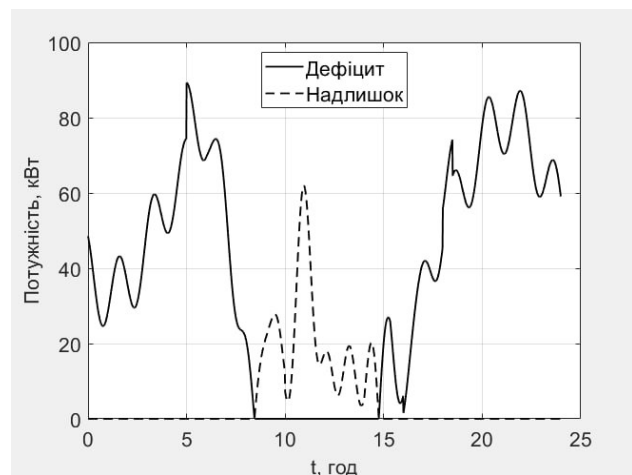


Рис. 4. Інтервали дефіциту та потенційного надлишку потужності у базовому сценарії S0

Таблиця 2

Ключові числові показники попереднього аналізу сценарію S0 без АКБ

Позначення	Значення	Коментар
$E_{def,ideal}$	912.00 кВт·год	Теоретична енергія дефіциту відносно $P_{set}(t)$
E_{excess}	124.55 кВт·год	Потенційний надлишок для заряду АКБ або обмеження
$P_{def,max}$	89.28 кВт	Максимальний миттєвий дефіцит потужності
$P_{ex,max}$	61.93 кВт	Максимальний миттєвий надлишок потужності

За результатами моделювання отримано: $E_{set} = 2360.00$ кВт·год; $E_{out} = 1628.59$ кВт·год; $E_{def} = 731.41$ кВт·год; $E_{spill} = 0.24$ кВт·год; $E_{ch} = 124.31$ кВт·год; $E_{dis} = 180.59$ кВт·год; $MAE = 30.48$ кВт; $\max|error| = 89.28$ кВт; $K_{track} = 69.01$ %; $N_{sw} = 6$; $T_{SOCmin} = 12.00$ год; $T_{SOCmax} = 0.00$ год; кількість перевищень порогового значення $|dP/dt| > R_{max}$ дорівнює 4. Тривалості режимів становили: N – 0.00 год, C – 6.12 год, S – 0.18 год, D – 5.28 год, F – 12.42 год. Отже, порівняно з випадком без АКБ інтегральний дефіцит зменшився на 180.59 кВт·год, або на 19.80 %.

Профіль SOC свідчить про швидке досягнення нижньої межі SOCmin на початку доби та повторний вихід на неї у вечірній зоні дефіциту. Для профілю S0 за прийнятого набору параметрів це означає, що головним обмежувальним чинником виступає саме енергетична ємність акумулятора, а не тільки межі миттєвої потужності заряду і розряду.

Параметричний аналіз чутливості проведено для чотирьох конфігурацій АКБ на одному й тому самому профілі S0: BASE, $E_{bat} \times 1.5$, $P_{ch}/P_{dis} \times 1.5$ та $E_{bat} \times 2$. Результати показують: збільшення енергетичної ємності АКБ до 360 і 480 кВт·год помітніше зменшує E_{def} і MAE , ніж підвищення лише меж $P_{ch,max}$ і $P_{dis,max}$. Отже, для цього профілю S0 і для розглянутих кейсів вплив енергетичної ємності накопичувача виявився сильнішим.

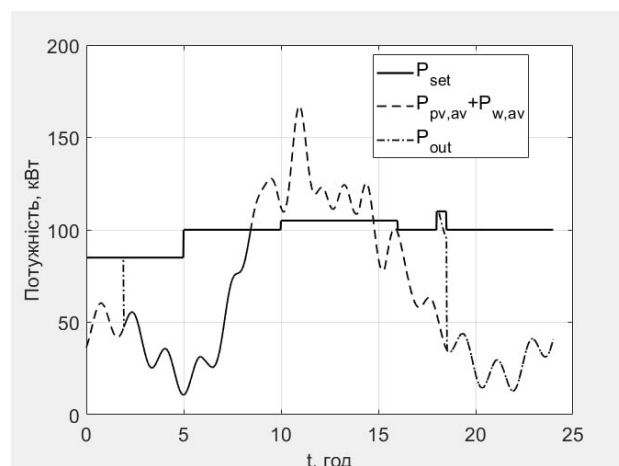


Рис. 5. Диспетчерське завдання, сумарна доступна потужність відновлюваних підсистем та фактична видача потужності у мережу в сценарії S0 при роботі алгоритму з АКБ

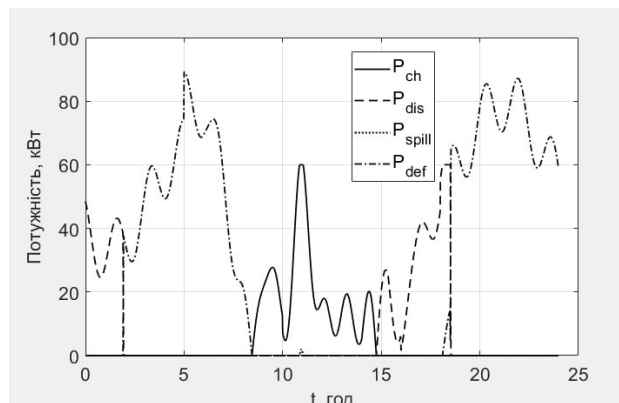


Рис. 6. Потоки керування акумуляторною підсистемою та енергетичні залишки: заряд, розряд, обмеження надлишку та дефіцит потужності в сценарії S0

Щоб перевірити працездатність алгоритму за зовнішнього збурення, виконано серію аварійних сценаріїв, у яких диспетчерське завдання $P_{set}(t)$ у вікні [18; 20] год тимчасово підвищували на +5 %, +10 % та +15 % відносно базового профілю. В усіх кейсах величина E_{out} залишалася сталою,

Таблиця 3

Порівняння ключових показників сценарію S0 без АКБ та з АКБ (диспетчерське моделювання)

Показник	Без АКБ (S0)	З АКБ (S0)	Коментар / зміна
E_{def} , кВт·год	912.00	731.41	Зменшення на 180.59 кВт·год (19.80 %)
E_{out} , кВт·год	1448.00*	1628.59	Зростання на 180.59 кВт·год
E_{spill} , кВт·год	124.55 (потенційний надлишок)	0.24	Майже повне використання надлишку ВДЕ
$P_{def,max}$, кВт	89.28	89.28	Піковий дефіцит не усунуто
K_{track} , %	н/д у S0 (без диспетчеризації)	69.01	Оцінено для керованого режиму з АКБ

Примітка. Для випадку без АКБ величину E_{out} оцінено як $E_{set} - E_{def,ideal}$ за припущення, що надлишок ВДЕ не може бути використаний для перевиконання диспетчерського завдання.

тоді як інтегральний дефіцит E_{def} майже лінійно зростає разом зі збільшенням E_{set} . Це вказує на вичерпання доступного резерву керованості в межах поточної конфігурації АКБ. Фактично такий тест фіксує насамперед нестачу резерву для даного типу збурення.

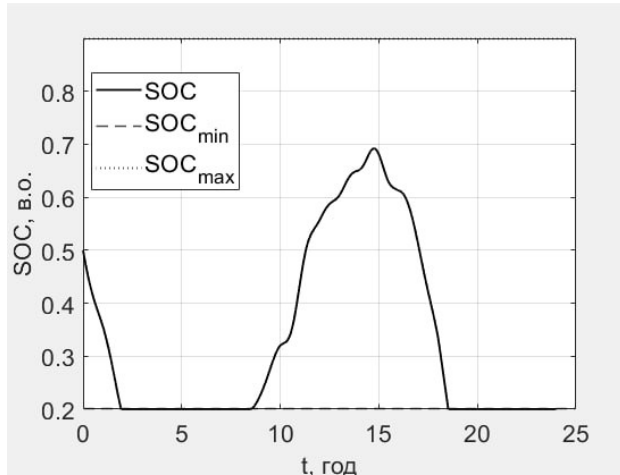


Рис. 7. Профіль стану заряду акумуляторної підсистеми $SOC(t)$ з урахуванням обмежень SOC_{min} та SOC_{max} у сценарії S_0

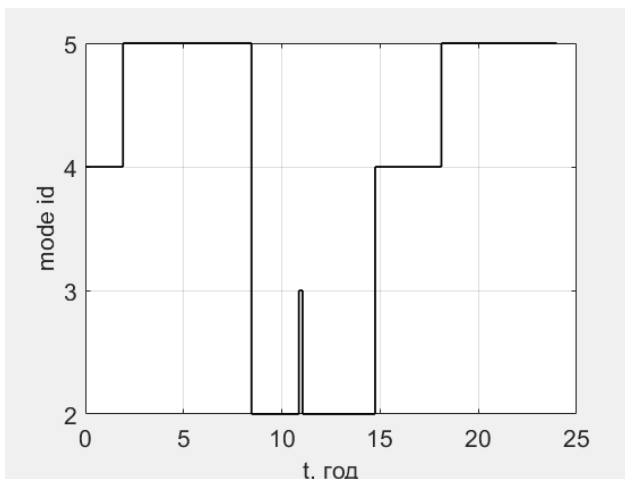


Рис. 8. Часова послідовність режимів роботи алгоритму керування розподілом потужності (N, C, S, D, F) у сценарії S_0

Додатково проаналізовано чутливість до початкового стану заряду АКБ для випадків $SOC_0 = 0.20, 0.50, 0.80$ та 0.90 на тому самому профілі

S_0 . Як показано в табл. 6, зі зростанням SOC_0 коефіцієнт відстеження K_{track} послідовно підвищується від 66.11 % до 72.87 %, а інтегральний дефіцит E_{def} зменшується від 799.81 до 640.21 кВт·год. Це підтверджує відчутний вплив стартового енергетичного запасу на результат однодобового диспетчерського моделювання.

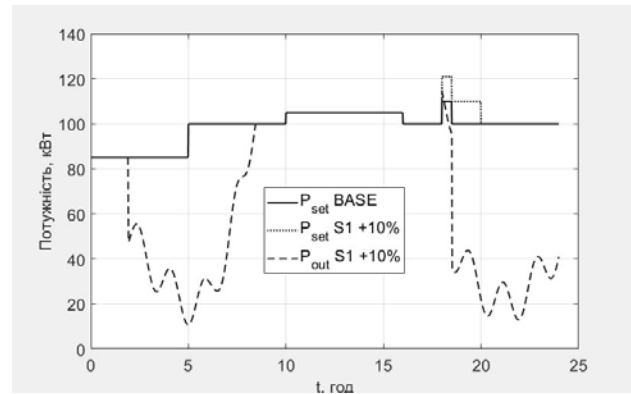


Рис. 9. Порівняння базового та аварійного профілів диспетчерського завдання і фактичної видачі потужності у вікні [18; 20] год (приклад для сценарію $S1\_emg\_+10\%$)

Окремо розглянуто три варіанти профілю доступної генерації: базовий профіль S_0 , сценарій зі зниженою сонячною генерацією та сценарій з підвищеною вітровою генерацією. Результати наведено в табл. 7. Для сценарію зі зниженою сонячною генерацією зафіксовано погіршення K_{track} до 57.68 % і зростання E_{def} до 998.72 кВт·год. Натомість у сценарії з підвищеною вітровою генерацією K_{track} збільшується до 80.40 %, а E_{def} зменшується до 462.64 кВт·год. Водночас покращення якості відстеження у вітровому сценарії супроводжується збільшенням кількості перемикань режимів до 12, що вказує на компроміс між якістю видачі та інтенсивністю режимних переключень.

Отримані результати свідчать, що запропонований алгоритм коректно відтворює базову логіку розподілу потужності між ФЕС, ВЕС та АКБ за заданим графіком видачі. Водночас якість відстеження істотно залежить від початкового енергетичного запасу АКБ і структури доступної

Таблиця 4

Результати параметричного аналізу чутливості конфігурації АКБ у сценарії S_0 .

Кейс	Ebat	Pch	Pdis	Ktrack, %	Edef	MAE	Tmin	Nsw
BASE	240	60	60	69.01	731.41	30.48	12.00	6
Ebat $\times 1.5$	360	60	60	70.46	697.21	29.05	11.02	6
Pch/Pdis $\times 1.5$	240	90	90	69.02	731.20	30.47	12.05	4
Ebat $\times 2$	480	60	60	71.91	663.01	27.63	10.40	6

Примітка. Ebat – кВт·год; Pch і Pdis – кВт; Edef – кВт·год; Tmin – год; Ktrack – %.

Таблиця 5

Результати моделювання аварійного сценарію з тимчасовим підвищенням диспетчерського завдання у вікні [18; 20) год.

Кейс	Δemg	Eset	Edef	MAE	Ktrack, %	max error
BASE	0	2360.00	731.41	30.48	69.01	89.28
S1 +5%	5	2370.25	741.66	30.90	68.71	89.28
S1 +10%	10	2380.50	751.91	31.33	68.41	89.28
S1 +15%	15	2390.75	762.16	31.76	68.12	92.48

Примітка. Δemg – %; Eset і Edef – кВт·год; MAE та max|error| – кВт; Ktrack – %.

Таблиця 6

Результати аналізу чутливості до початкового стану заряду АКБ у сценарії S0.

SOC0	Edef, кВт·год	MAE, кВт	Ktrack, %	Tmin, год	Nsw
0.20	799.81	33.33	66.11	13.93	5
0.50	731.41	30.48	69.01	12.00	6
0.80	663.01	27.63	71.91	10.40	6
0.90	640.21	26.68	72.87	9.98	6

Таблиця 7

Результати моделювання для варіантів профілю доступної генерації.

Кейс	Edef, кВт·год	MAE, кВт	Ktrack, %	Nsw
BASE	731.41	30.48	69.01	6
Знижена сонячна	998.72	41.61	57.68	7
Підвищений вітер	462.64	19.28	80.40	12

відновлюваної генерації. Підвищення SOC0 зменшує Edef і MAE; сценарій зі зниженою сонячною генерацією, навпаки, погіршує Ktrack; підвищена вітрова генерація дає кращий результат, але ціною більш інтенсивних перемикачів режимів. Інтерпретувати ці висновки як доказ переваги правил алгоритму над MPC чи оптимізаційними схемами не слід, оскільки benchmark-порівняння в межах цієї роботи не проводилося. Для подальшого підвищення якості відстеження в цій установці потрібне або збільшення Ebat,ном, або стратегія підтримання резерву SOC, або залучення додаткового керованого джерела.

Висновки. 1) Сформовано дискретну математичну модель розподілу потужності між фотоелектричною, вітровою та акумуляторною підсистемами гібридної установки з урахуванням балансу потужності, динаміки стану заряду акумуляторної батареї, фактичної видачі потужності та обмежень заряду/розряду. 2) Запропоновано покроковий правилний алгоритм керування, у якому залишкова потужність використовується

як основна координата прийняття рішень для реалізації режимів заряду, розряду, обмеження надлишку та дефіциту. 3) Чисельне моделювання показало: введення акумуляторної батареї у сценарії S0 зменшує інтегральний дефіцит на 19.80 % і майже усуває скидання денного надлишку відновлюваної генерації, але не ліквідує піковий дефіцит у структурно дефіцитному профілі. 4) Для розглянутого профілю S0 збільшення енергетичної ємності акумуляторної батареї виявилось помітніше ефективним, ніж нарощування лише меж миттєвої потужності; підвищення початкового стану заряду від 0.20 до 0.90 збільшує коефіцієнт відстеження від 66.11 % до 72.87 %. 5) Одержані результати доцільно розглядати як основу для правилного сценарного аналізу; пряме benchmark-порівняння з MPC та іншими альтернативними контролерами належить до подальших досліджень. Перспективними є введення резервування стану заряду, розширення набору сценаріїв, а також урахування деградації акумулятора й динамічних обмежень перетворювачів.

Список літератури:

1. Olatomiwa L., Mekhilef S., Ismail M. S., Moghavvemi M. Energy management strategies in hybrid renewable energy systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 62. P. 821-835. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.040>.
2. León Gómez J. C., De León Aldaco S. E., Aguayo Alquicira J. A review of hybrid renewable energy systems: Architectures, battery systems, and optimization techniques. *Eng.* 2023. Vol. 4, no. 2. P. 1446-1467. DOI: <https://doi.org/10.3390/eng4020084>.

3. Aissou S., Rekioua D., Mezzai N., Rekioua T., Bacha S. Modeling and control of hybrid photovoltaic wind power system with battery storage. *Energy Conversion and Management*. 2015. Vol. 89. P. 615-625. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.10.034>.
4. Dali M., Belhadj J., Roboam X. Hybrid solar-wind system with battery storage operating in grid-connected and standalone mode: Control and energy management – experimental investigation. *Energy*. 2010. Vol. 35, no. 6. P. 2587-2595. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.03.005>.
5. Elkazaz M., Sumner M., Thomas D. Energy management system for hybrid PV-wind-battery microgrid using convex programming, model predictive and rolling horizon predictive control with experimental validation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020. Vol. 115. Article 105483. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105483>.
6. Kechida A., Gozim D., Toual B. et al. Smart control and management for a renewable energy based stand-alone hybrid system. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Article 32039. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83826-1>.
7. Halmous A., Oubatti Y., Lahdeb M. et al. Optimizing control and management of hybrid power system, consisting PV-wind and battery-super capacitor, using COOT algorithm. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article 33342. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-12585-4>.

Myroniuk F.Yu., Beglov K.V., Zyma I.V. POWER DISTRIBUTION CONTROL IN A HYBRID ENERGY SYSTEM WITH SOLAR, WIND, AND BATTERY SUBSYSTEMS

The article proposes a discrete mathematical model and a step-by-step control algorithm for power distribution among the solar, wind, and battery subsystems of a hybrid energy system operating under a predefined dispatch schedule. The model covers power balance, discrete battery state-of-charge dynamics, charge and discharge limits, modes of surplus-generation curtailment and deficit, as well as formalization of the actual power delivered to the grid. The algorithm is constructed as a transparent step-by-step rule-based dispatch procedure. Its key decision variable is residual power: depending on its sign and magnitude, the priority is given to direct use of solar and wind generation, battery charging in case of surplus, or battery discharging to cover deficit within physical limits. Control quality was evaluated using the integral energy deficit, curtailed surplus, mean absolute error, tracking coefficient, time spent at the state-of-charge limits, number of mode switches, and number of exceedances of the threshold ramp rate of delivered power. Numerical simulations were carried out for a baseline daily scenario as well as for parametric, emergency, and sensitivity cases. It is shown that the presence of a battery reduces the integral deficit compared with a configuration without storage. Increasing battery energy capacity produces a more noticeable effect than increasing only the instantaneous charge and discharge power limits. Raising the initial battery state of charge from 0.20 to 0.90 improves tracking of the predefined schedule and reduces the integral energy deficit. The study is oriented toward reproducible engineering scenario modeling of hybrid solar-wind systems with battery storage without using a forecasting layer.

Keywords: hybrid energy system, solar generation, wind generation, battery energy storage, power distribution, control algorithm, mathematical model, scenario modeling.

Дата першого надходження статті до видання: 19.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Нікітін В.С.

<https://orcid.org/0009-0001-1385-8714>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Гіоргізова-Гай В.Ш.

<https://orcid.org/0000-0001-6224-3532>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПІДХІД ДО ГЕНЕРАЦІЇ ШАБЛОНІВ ДОКУМЕНТІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ LLM АГЕНТІВ

У статті запропоновано підхід до автоматичної генерації шаблонів документів на основі зображень паперових або електронних форм із використанням великих мовних моделей та агентної обробки. Актуальність дослідження зумовлена потребою у стандартизації документообігу, зростанням обсягів неструктурованих даних і необхідністю скорочення часу на ручне проєктування електронних форм та шаблонізованих документів. Запропонований підхід забезпечує перетворення зображення документа на структурований JSON-шаблон, придатний для подальшого рендерингу у вигляді інтерактивної форми та шаблонізованого документа. Визначено основні вимоги до формату шаблону: безпека даних, легкість парсингу та валідації, а також придатність до генерації засобами LLM. Шаблон поділено на три складові: конфігурацію даних, структуру електронної форми та структуру фінального документа.

Архітектура системи включає вхідне зображення документа, приклад документа з еталонним JSON-шаблоном, доменно-специфічні інструкції, а також два LLM-агенти – *FirstPass* і *Refiner*. Перший агент формує початковий шаблон, а другий доопрацьовує його з урахуванням результатів автоматичної валідації.

Для оцінювання якості генерованих шаблонів використано порівняння з еталонними шаблонами та метрики структурної подібності. Експериментальне дослідження проведено на документах з кількох предметних областей, серед яких юридичні, військові та документи з охорони праці. Порівнювались результати роботи системи із застосуванням низки сучасних пропріетарних і open-weight моделей та результати роботи двох LLM-агентів. Результати дослідження свідчать, що застосування двоетапної схеми генерації з подальшою валідацією дозволяє зменшити кількість структурних помилок у фінальному результаті. Імплементация запропонованого підходу дозволить прискорити цифровізацію документів, уніфікувати структуру форм, знизити навантаження на розробників та створити базу для подальшої автоматизації побудови електронних сервісів документообігу. Запропонований підхід може бути використаний як основа для розроблення гнучких систем генерації форм і документів у різних прикладних сферах.

Ключові слова: великі мовні моделі, електронні форми, шаблони документів, автоматизація документообігу, генеративні користувацькі інтерфейси, інтелектуальні розподілені обчислення.

Постановка проблеми. Питання стандартизації та автоматизації документообігу набувають особливої актуальності в контексті цифрової трансформації суспільства. Уніфіковані підходи до структурування документів є необхідною умовою їх сумісності, верифікації та довгострокового зберігання, тоді як автоматизація процесів генерації документів суттєво знижує операційні витрати й мінімізує вплив людського фактора [8, с. 10]. Дослідження цих аспектів відкриває можливості

для розроблення ефективніших інструментів управління документацією у великих інформаційних системах.

Про актуальність даної проблеми свідчить, наприклад, активне впровадження та розширення функціоналу електронних рапортів у мобільному застосунку *Армія+* [10], що будує документообіг за допомогою покрокових форм з чіткими правилами валідації, на противагу неструктурованим файлам у форматі *.docx.

Окремо слід підкреслити, що, згідно з дослідженнями останніх десяти років, близько 80% даних, створюваних різноманітними організаціями, належать до неструктурованих [2, с. 2], що суттєво ускладнює їх аналітичне опрацювання.

Сфери застосування шаблонів документів включають:

- юридичні документи (договори, заяви тощо): стандартизовані шаблони дозволяють швидко конструювати документи з повторюваних блоків і погоджених формулювань, знижуючи ризик юридично значущих помилок. Вони полегшують комплаєнс: зміни відслідковуються, версії зберігаються, а контрольні списки та перевірки інтегруються безпосередньо в процес підготовки;

- військові документи: у військовій сфері стандартизація документів набуває особливого значення через потребу в оперативному обміні інформацією та мінімізації двозначності. Застосування на кшталт Армія+ демонструють, як структуровані електронні форми забезпечують швидке та точне заповнення звітів, рапортів та заяв навіть у польових умовах. Чітка структура та обмеження на формат даних знижують імовірність критичних помилок, полегшують автоматичну обробку великих обсягів документів та забезпечують можливість швидкого пошуку й аналізу інформації, що є життєво важливим для прийняття своєчасних управлінських рішень;

- документи з охорони праці (інструктажі тощо). Електронні форми допомагають системно збирати підтвердження проходження інструктажів, фіксувати події безпеки та підтримувати актуальність інструкцій. Шаблони гарантують повноту обов'язкових розділів, спрощують аудит відповідності і пришвидшують оновлення матеріалів при зміні нормативної бази.

Разом з тим, сучасні великі мовні моделі демонструють значний потенціал як інструмент автоматизації: зокрема, їхня здатність до генерації програмного коду істотно спрощує процес переходу від існуючих неструктурованих документів до стандартизованих форматів електронного документообігу [1, с. 9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розробник британського державного порталу GOV. UK, у двох публікаціях описав підхід до автоматизованого перетворення PDF-форм на веб-форми за допомогою великих мовних моделей [3; 7].

Запропонований інструмент приймає на вхід PDF-документи, зображення у форматах JPEG або PNG, а також рукописні ескізи форм, і генерує на виході структурований JSON-опис форми.

Такий опис містить назву вихідного файлу, структуру сторінок із зазначенням кількості запитань на кожній із них, а також детальну специфікацію кожного запитання. Для кожного елемента фіксуються текст запитання, підказки для користувача, тип відповіді (число, дата, текст тощо) та можливі варіанти вибору. Процес генерації побудовано максимально просто й фактично зведено до одного виклику мовної моделі з використанням механізму «tools» для отримання структурованої відповіді.

Водночас запропоноване рішення має низку обмежень. Насамперед можна відзначити слабе відокремлення структури даних від їх подання: результат роботи системи подається як масив елементів інтерфейсу без унікальних ідентифікаторів, що може ускладнювати подальше опрацювання відповідей кінцевого користувача в межах більшої інформаційної системи. Крім того, у підході відсутні чітко визначені критерії оцінювання якості згенерованої форми: автор наводить приклади некоректної роботи системи, однак не пропонує формалізованих способів виявлення або запобігання подібним помилкам.

Як зазначають автори роботи [6, с. 2], генеративні підходи до побудови користувацьких інтерфейсів суттєво ускладнюють забезпечення їх передбачуваності та керованості. Динамічна генерація елементів інтерфейсу під конкретне завдання загрожує порушенням принципу консистентності – одного з фундаментальних принципів проектування інтерфейсів: нові елементи можуть з'являтися в непередбачуваних місцях і не узгоджуватися з рештою системи, що призводить до когнітивного перевантаження та дезорієнтації користувача.

У роботі [4, с. 133] наводяться нові емпіричні дані, що засвідчують: проблеми доступності у згенерованих інтерфейсах залишаються актуальними попри стрімкий розвиток ІІІ та посилення нормативних вимог. На думку авторів, це зумовлює необхідність зосередитися на розробленні стратегій, які змінять саме розуміння доступності системами штучного інтелекту – від формального дотримання технічних чеклістів до орієнтації на реальні потреби користувачів та контексти їхньої взаємодії з продуктом.

Постановка завдання. Метою статті є представлення підходу до автоматичної генерації шаблонів документів на основі зображень існуючих форм з використанням великих мовних моделей. Запропоноване рішення призначене для інтеграції в робочі процеси розробників програмного

забезпечення, а не для використання як окремий користувацький продукт.

Практичним результатом роботи системи є два взаємодоповнювальні артефакти. Перший – це електронна форма введення даних, яка забезпечує зручний структурований інтерфейс із підказками та автоматичною валідацією, що унеможливорює формальні помилки ще на етапі заповнення. Другий артефакт – це шаблонізований документ, що відповідає за перетворення зібраних даних на читабельний вихідний файл у форматі PDF, придатний для друку чи архівування. Розмежування між логікою даних і конкретним засобом відображення досягається через платформонезалежне JSON-представлення, що дозволяє інтегрувати систему в мобільні застосунки, десктопні програми або чат-боти без переробки базової логіки.

Виклад основного матеріалу. Вимоги до формату генерованих шаблонів документів включають:

- безпеку даних – відсутність виконуваного коду в шаблоні з метою запобігання потенційним вразливостям (ін'єкції коду тощо);

- легкість парсингу та валідації – можливість швидкого розбору шаблону за допомогою стандартних бібліотек (JSON, YAML), а також можливість декларативного опису формату для валідації шаблонів;

- зручність для генерації за допомогою LLM.

Концептуально шаблон документа розділено на три основні складові, кожна з яких відповідає за окремий аспект представлення інформації. Перший елемент – конфігурація даних, що описує змінні та їхні типи. Ця частина визначає, які саме дані мають бути зібрані від користувача або надані системою для заповнення документа. Типізація змінних охоплює базові примітиви на кшталт тексту і чисел, складні структури як об'єкти і масиви, а також специфічні для документообігу типи – підписи, зображення, часові мітки. Кожна змінна описується не лише своїм типом, але й додатковими властивостями, такими як обов'язковість заповнення, значення за замовчуванням, та обмеження на мінімальну і максимальну кількість елементів для колекцій.

Друга складова шаблону – структура електронної форми, що складається з компонентів. Компоненти визначають інтерфейс взаємодії користувача з системою при заповненні даних. До них належать текстові поля введення, числові поля, перемикачі, випадаючі списки, компоненти для підпису документів і багато інших. Кожен компонент пов'язаний з однією або декількома змінними з конфігурації даних і визначає спосіб візуалізації та валідації введеної інформації. Така архітектура забезпечує чітке розмежування між структурою даних і способом їх

збору, що дозволяє використовувати одні й ті самі змінні в різних контекстах або, навпаки, застосовувати різні компоненти для збору однакових за типом даних залежно від бізнес-логіки.

Третя складова – це опис структури фінального документа через систему віджетів. Віджети відповідають за представлення даних у згенерованому PDF документі або іншому форматі виводу. Вони визначають розташування текстових блоків, таблиць, зображень, підписів та інших елементів на сторінках документа. Важливою особливістю є підтримка складних ієрархічних структур через контейнери, що можуть містити інші віджети, та ітератори, що дозволяють генерувати повторювані блоки на основі масивів даних. Така гнучкість дозволяє створювати складні документи з адаптивною структурою без необхідності генерувати множину окремих шаблонів для різних сценаріїв використання.

Мінімальний приклад шаблону у форматі JSON наведено на рис. 1.

```
{
  "variables": {
    "applicant_full_name": {
      "type": "TEXT",
      "required": true,
      "defaultValue": ""
    }
  },
  "components": [
    {
      "type": "HEADING",
      "level": 2,
      "text": "Дані заявника"
    },
    {
      "type": "INPUT",
      "label": "ПІБ",
      "placeholder": "Ім'я ПРИЗВИЩЕ",
      "variable": "applicant_full_name"
    }
  ],
  "widgets": [
    {
      "type": "PARAGRAPH",
      "widgets": [
        {
          "type": "STATIC_TEXT",
          "text": "Я, "
        },
        {
          "type": "TEXT_VALUE",
          "variable": "applicant_full_name"
        },
        {
          "type": "STATIC_TEXT",
          "text": ", прошу [...]"
        }
      ]
    }
  ]
}
```

Рис. 1. Мінімальний приклад шаблону у форматі JSON

На рисунку 2 представлено основні компоненти системи та потоки даних між ними.

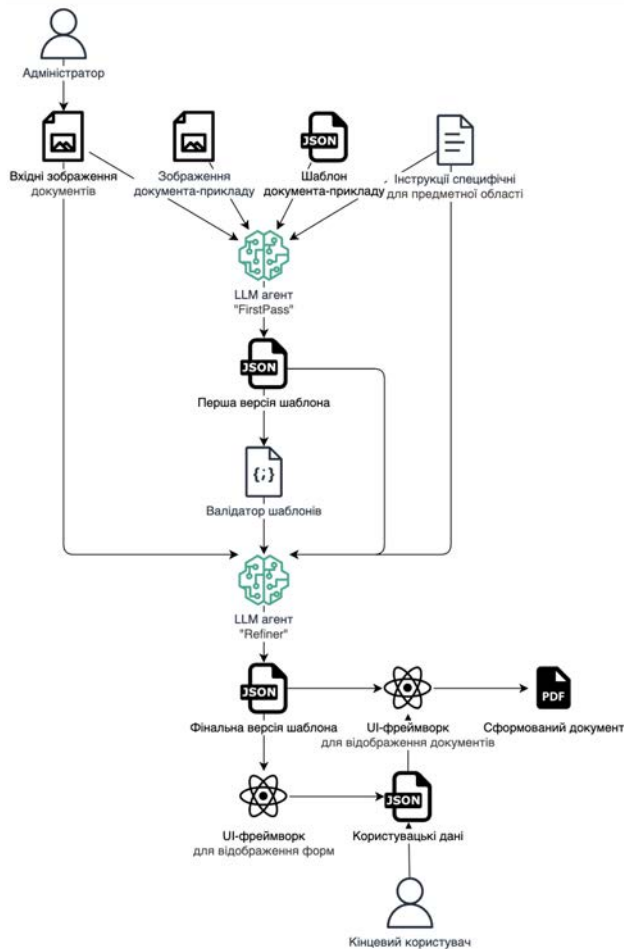


Рис. 2. Функціональна схема системи генерації шаблонів документів

Ключовими елементами на рисунку 2 є:

1. Вхідні зображення документа – скан-копії або фото реальних форм, які потрібно оцифрувати і перетворити на шаблон.

2. Зображення документа-прикладу та його JSON-шаблон демонструють моделі типову структуру даних у певній предметній області. Такий приклад визначається розробником системи і є відмінним від вхідного документа з п. 1.

3. Інструкції, специфічні для предметної області, описують правила, яких мають дотримуватись всі згенеровані шаблони, у довільній формі. Наприклад: «All generated text (labels, placeholders etc.) must be in Ukrainian».

4. FirstPass – це LLM-агент, який на основі зображень та інструкцій будує першу чернетку шаблону у форматі JSON.

5. Валідатор – це модуль, який автоматично перевіряє згенерований шаблон на структурну коректність, повноту полів і відповідність схемі системи.

6. Refiner – це другий LLM-агент, який, використовуючи результати валідації, покращує й виправляє початковий шаблон, формуючи його фінальну версію.

Оцінка коректності шаблону фокусується на аналізі типів використаних елементів незалежно від їх порядку в документі. Структурна оцінка перевіряє, чи правильно мовна модель ідентифікувала типи компонентів форми (INPUT, TEXTAREA, YES_NO_CHECKBOX тощо), типи змінних (TEXT, NUMERIC, BOOLEAN тощо) та типи віджетів документа (CONTAINER, TABLE, LABELED_ITEM тощо).

Для оцінки якості розпізнавання типів використовується індекс Жаккара [5, с. 74]:

$$TP_c = \min(count_{pred}(c), count_{true}(c))$$

$$J_c = \frac{TP_c}{count_{true}(c) + count_{pred}(c) - TP_c}$$

де $count_{pred}(c)$ – кількість елементів класу c в згенерованому шаблоні,

$count_{true}(c)$ – кількість елементів класу c в еталонному шаблоні.

Дана метрика спочатку обчислюється на рівні окремих класів, після чого агрегується у середнє зважене (weighted average) значення, що дозволяє отримати загальну оцінку якості окремого компонента шаблону.

$$J_{weighted} = \frac{\sum_{c \in C} J_c \cdot count_{true}(c)}{\sum_{c \in C} count_{true}(c)}$$

Для отримання єдиної оцінки для всього шаблону використовується гармонійне середнє:

$$J_{template} = \frac{3}{\frac{1}{J_{variables}} + \frac{1}{J_{components}} + \frac{1}{J_{widgets}}}$$

Систему було протестовано на документах з трьох предметних областей: україномовні юридичні документи (договори, заяви), україномовні військові документи (рапорти та заяви) та англійські документи з охорони праці на будівництві (pre-task plan). Для кожної предметної області було відібрано по три приклади документів, специфічних для конкретної галузі. Для кожного документа було розроблено еталонний шаблон, з яким в подальшому порівнювались результати генерації моделей.

Тестування виконувалось для новітніх пропріетарних великих мовних моделей (Claude Sonnet 4, Gemini 2.5 Flash, Gemini 2.5 Pro, GPT-5 High) та open-weight моделей (Llama 4 Maverick та Qwen3 VL 235B A22B Thinking).

Порівняння результатів тестування за індексом Жаккара (рис. 3) показало суттєву перевагу про-

прістарних LLM над open-weight моделями у відтворенні структури шаблонів. Значення метрики для пропрістарних моделей наближаються до 1, що вказує на точніше розпізнавання полів та вищу узгодженість конфігурації змінних з еталоном. Найстабільніші показники в усіх трьох предметних областях продемонстрували Gemini 2.5 Flash, Gemini 2.5 Pro та GPT-5, що робить їх пріоритетними кандидатами для впровадження у розроблену систему.

Окрім метрик, заснованих на порівнянні з етальонним шаблоном, додатково аналізувалася кількість помилок валідації на кожному етапі генерації. На рисунку 4 ці дані подано у форматі «кількість помилок FirstPass → кількість помилок Refiner». На рисунку видно, що в 33 із 45 експериментів початковий шаблон порушує декларативні правила валідації, закладені в системі, і не може бути безпосередньо використаний для відображення форми або генерації документа. Водночас

у переважній більшості випадків Refiner зменшує кількість помилок або залишає її незмінною, скорочуючи число невалідних шаблонів до 19.

Розглянемо приклад роботи системи з використанням моделі Google Gemini 2.5 Pro. В якості вхідних даних використовувався зразок рапорту про недоотримане майно, отриманий з відкритих джерел [9]. Вхідними даними виступає скріншот незаповненого зразка в текстовому редакторі (рис. 5).

На рисунку 6 зображено фрагмент електронної форми, згенерованої системою. На даному прикладі видно, що:

– модель виділила логічні секції («Дані отримувача», «Деталі рапорту», «Дані заявника») та створила для них відповідні заголовки;

– змінні реквізити були коректно представлені полями типу INPUT (текстові поля для посади, військової частини, звання, ПІБ тощо) та NUMERIC_INPUT (поля з числовими значеннями, зокрема



Рис. 3. Гармонійне середнє значення коефіцієнтів Жаккара для набору тестових документів

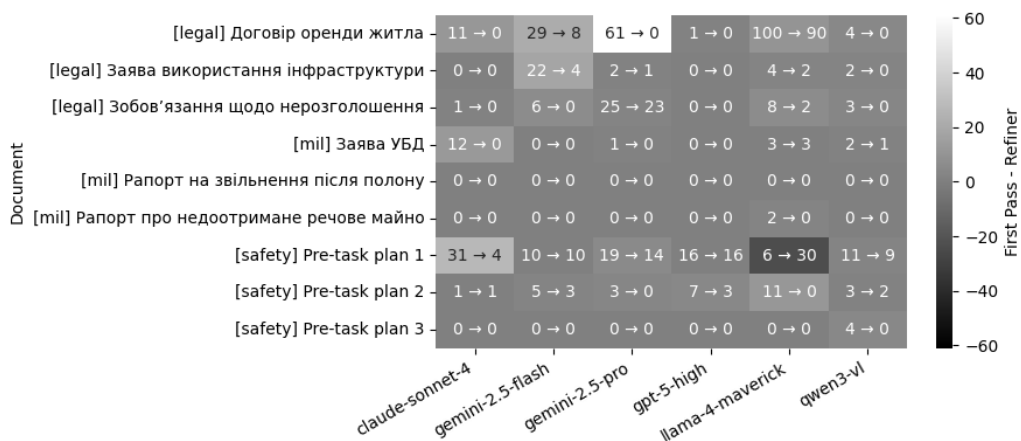


Рис. 4. Кількість помилок валідації для FirstPass та Refiner

Командиру 00 відділення 00 роти
00 батальйону військової частини A0000

РАПОРТ

У зв'язку із звільненням з військової служби / переведення до іншого військового формування) прошу Вашого клопотання перед вищим командуванням щодо проведення розрахунку розміру грошової компенсації вартості за неотримане мною речове майно відповідно до "Порядку виплати військовослужбовцям Збройних Сил, Національної гвардії, Служби безпеки, Служби зовнішньої розвідки, Державної прикордонної служби, Державної спеціальної служби транспорту, Державної служби спеціального зв'язку та захисту інформації і Управління державної охорони" грошової компенсації вартості за неотримане речове майно, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 16.03.2016 року № 178.

(Посада, наприклад, "Гранатометник") (номер) відділення (номер/назва) роти (номер/назва) батальйону військової частини A0000

(Звання, наприклад "Старший солдат") 00.00.2024 р.

Ім'я та ПРІЗВИЩЕ

Командиру військової частини A0000

Клопочу по суті рапорту (звання та ім'я прізвище військовослужбовця, що подає рапорт. Наприклад, "старшого солдата Володимира ПЕТРЕНКО")

Командир (номер) відділення (номер/назва) роти (номер/назва) батальйону військової частини A0000

Звання 00.00.2024 р.

Ім'я та ПРІЗВИЩЕ

Рис. 5. Вхідне зображення документа

номери відділення, роти та батальйону);
– для окремих полів, що мають обмежену кількість можливих варіантів, наприклад «Причина» подання

рапорту, було згенеровано поле типу DROPDOWN, що дозволяє обрати значення зі списку.

Отже, система коректно інтерпретувала структуру вхідного документа і перетворила його на валідний опис електронної форми у форматі JSON.

Другим артефактом роботи системи є шаблонізований текст рапорту, який так само зберігається у форматі JSON і описується через систему віджетів (параграфи, статичний текст, змінні, розриви рядків тощо). Через значний обсяг та вкладеність цієї структури відобразити її в межах даного прикладу складно, тому на рисунку 7 наведено готове представлення згенерованих віджетів засобами UI-фреймворку. Для наочного співставлення полів форми з відповідними місцями в тексті документа використовується синтаксис {{назва_змінної}}, наприклад {{applicant_full_name}}.

Загалом система коректно відтворила структуру вхідного документа: дані, які вводить користувач, оформлено як окремі поля форми, тоді як незмінний текст рапорту перенесено в шаблон без суттєвих спотворень.

Generated form [gemini-2.5-pro]

```
{ "type": "HEADING", "level": 2, "text": "Дані отримувача" }
```

```
{ "type": "NUMERIC_INPUT", "label": "Номер відділення отримувача", "placeholder": "00", "variable": "recipient_squad_number" }
```

```
{ "type": "INPUT", "label": "Номер роти отримувача", "placeholder": "00", "variable": "recipient_company_number" }
```

```
{ "type": "INPUT", "label": "Номер батальйону отримувача", "placeholder": "00", "variable": "recipient_battalion_number" }
```

```
{ "type": "INPUT", "label": "Код військової частини отримувача", "placeholder": "A0000", "variable": "recipient_military_unit_code" }
```

```
{ "type": "HEADING", "level": 2, "text": "Деталі рапорту" }
```

```
{ "type": "DROPDOWN", "label": "Причина", "variable": "reason" }
```

```
{ "type": "HEADING", "level": 2, "text": "Дані заявника" }
```

```
{ "type": "INPUT", "label": "Посада", "placeholder": "Гранатометник", "variable": "applicant_position" }
```

```
{ "type": "INPUT", "label": "Номер відділення", "placeholder": "номер", "variable": "applicant_squad_number" }
```

Дані отримувача

Номер відділення отримувача
00

Номер роти отримувача
00

Номер батальйону отримувача
00

Код військової частини отримувача
A0000

Деталі рапорту

Причина
⌵

Дані заявника

Посада
Гранатометник

Номер відділення
номер

Рис. 6. Фрагмент згенерованої форми

Generated document

Командиру {{recipient_squad_number}} відділення {{recipient_company_number}} роти
{{recipient_battalion_number}} батальйону військової частини {{recipient_military_unit_code}}

РАПОРТ

У зв'язку із {{reason}} прошу Вашого клопотання перед вищим командуванням щодо проведення
розрахунку розміру грошової компенсації вартості за неотримане мною речове майно відповідно до
"Порядку виплати військовослужбовцям Збройних Сил, Національної гвардії, Служби безпеки,
Служби зовнішньої розвідки, Державної прикордонної служби, Державної спеціальної служби
транспорту, Державної служби спеціального зв'язку та захисту інформації і Управління державної
охорони" грошової компенсації вартості за неотримане речове майно, затвердженого постановою
Кабінету Міністрів України від 16.03.2016 року № 178.

{{applicant_position}} {{applicant_full_name}}
{{applicant_squad_number}} відділення
{{applicant_company_number}} роти
{{applicant_battalion_number}}
батальйону військової частини
{{applicant_military_unit_code}}
{{applicant_rank}}
{{report_date}} р.

Командиру військової частини {{approving_commander_unit_code}}

Клопочу по суті рапорту {{applicant_rank_and_name_genitive}}.

Командир {{applicant_squad_number}} {{approver_full_name}}
відділення
{{applicant_company_number}} роти
{{applicant_battalion_number}}
батальйону військової частини
{{applicant_military_unit_code}}
{{approver_rank}}
{{approval_date}} р.

Рис. 7. Шаблонізований документ

Висновки. Проведене дослідження підтверджує доцільність застосування великих мовних моделей для автоматизації процесу генерації шаблонів документів. Аналіз експериментальних результатів показав, що на сьогодні можливості open-weight моделей є недостатніми для рішення даного класу задач та суттєво поступають можливостям пропріетарних моделей, серед яких Gemini 2.5 Pro продемонструвала найбільш збалансовані показники якості генерованих шаблонів документів.

Застосований двоетапний підхід з агентами «FirstPass» та «Refiner» показав свою ефективність, підтвердивши здатність мовних моделей до самокорекції при наданні детальної інформації про виявлені помилки, хоча у деяких випадках навіть повторний запит не призводить до повного виправ-

лення помилок, що вказує на необхідність розробки більш складних механізмів контролю якості.

Запропонований підхід може бути використаний як основа для розроблення гнучких систем генерації форм і документів у різних прикладних сферах. Для його успішної реалізації головне значення мають: наявність чітко визначених метрик оцінки якості результату для вибору ефективних LLM агентів, використання декларативних правил валідації на основі схем, а також надання моделі прикладів у форматі few-shot або one-shot learning безпосередньо в контекстному вікні, що дозволяє сформувати адекватне уявлення про очікуваний формат виводу.

Подальший напрямок досліджень може бути спрямований на експерименти з донавчанням open-weight моделей.

Список літератури:

1. Achachlouei M.A., Patil O., Joshi T., Nair V.N. Document Automation Architectures: Updated Survey in Light of Large Language Models. arXiv preprint. Ithaca, NY, 2023. 15 p. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.09341>

2. Baviskar D., Ahirrao S., Potdar V., Kotecha K. Efficient Automated Processing of the Unstructured Documents Using Artificial Intelligence: A Systematic Literature Review and Future Directions. *IEEE Access*. 2021, Vol. 9. P. 72894–72936. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3072900>
3. Could AI convert all the PDF forms on GOV.UK into web forms? URL: <https://www.timpaul.co.uk/posts/could-ai-convert-all-the-pdf-forms-on-gov-uk-into-web-forms/> (дата звернення: 20.03.2026).
4. Gurita A.-E., Vataavu R.-D. When LLM-Generated Code Perpetuates User Interface Accessibility Barriers, How Can We Break the Cycle? *W4A '25: Proceedings of the 22nd International Web for All Conference* (Sydney, NSW, Australia, 2025). New York, NY, USA, 2025. P. 124–134. DOI: 10.1145/3744257.3744266.
5. Leskovec J., Rajaraman A., Ullman J. D. Mining of Massive Datasets. 2nd ed. Cambridge, 2014. 476 p.
6. Okopnyi P., Nordberg O. E., Guribye F. Against Generative UI. *Proceedings of the Halfway to the Future Symposium* (Santa Cruz, CA, USA, 2024). New York, NY, USA, 2024. P. 1–4. DOI: 10.1145/3686169.3686184.
7. Using AI to generate web forms from PDFs. URL: <https://www.timpaul.co.uk/posts/using-ai-to-generate-web-forms-from-pdfs/> (дата звернення: 20.03.2026).
8. Walther B., Hossin S., Townend J., Abernethy N. et al. Comparison of Electronic Data Capture (EDC) with the Standard Data Capture Method for Clinical Trial Data. *PLOS ONE*. 2011. Vol. 6, No. 9. e25348. DOI: 10.1371/journal.pone.0025348.
9. Зразки рапортів - Турбота про військовослужбовця. URL: <https://turbota.mil.gov.ua/zrazky-documentiv> (дата звернення: 20.03.2026).
10. Рапорти на відпустку, виплати, лікування, звільнення | Армія+ : веб-сайт. URL: <https://aplus.mod.gov.ua/gaporty> (дата звернення: 20.03.2026).

Nikitin V.S., Hiorhizova-Hai V.S. AN APPROACH TO DOCUMENT TEMPLATE GENERATION USING LLM AGENTS

The article proposes an approach to the automatic generation of document templates from images of paper or electronic forms using large language models and agent-based processing. The relevance of the study is driven by the need to standardize document workflows, the growing volume of unstructured data, and the need to reduce the time required for the manual design of electronic forms and templated documents. The proposed approach enables the transformation of a document image into a structured JSON template suitable for subsequent rendering as an interactive form and a templated document. The main requirements for the template format are identified as data security, ease of parsing and validation, and suitability for generation by LLMs. The template is divided into three components: data configuration, electronic form structure, and final document structure.

The system architecture includes an input document image, an example document with a reference JSON template, domain-specific instructions, and two LLM agents – FirstPass and Refiner. The first agent generates the initial template, while the second refines it based on the results of automatic validation.

To evaluate the quality of the generated templates, comparison with reference templates and structural similarity metrics were used. The experimental study was conducted on documents from several domains, including legal, military, and occupational safety documents. The results of the system using a number of modern proprietary and open-weight models, as well as the results produced by the two LLM agents, were compared. The findings indicate that applying a two-stage generation scheme followed by validation reduces the number of structural errors in the final result. Implementing the proposed approach can accelerate document digitalization, unify form structures, reduce the workload on developers, and provide a foundation for further automation in the development of electronic document workflow services. The proposed approach can serve as a basis for developing flexible systems for generating forms and documents in various application domains.

Keywords: large language models, electronic forms, document templates, document workflow automation, generative user interfaces, intelligent distributed computing.

Дата першого надходження статті до видання: 25.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

УДК 004.96

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.1/25>

Олексій А.О.

<https://orcid.org/0009-0006-5354-8098>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Дичка І.А.

<https://orcid.org/0000-0002-3446-3076>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Олещенко Л.М.

<https://orcid.org/0000-0001-9908-7422>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Хічко Я.В.

<https://orcid.org/0000-0002-6455-8498>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сушук-Слюсаренко В.І.

<https://orcid.org/0000-0002-6096-3832>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОГЛЯД МОЖЛИВИХ УДОСКОНАЛЕНЬ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО МЕТОДУ UWAR-GAN ТА НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЇ АРХІТЕКТУРИ U-NET ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИДУШЕННЯ ФОНОВИХ ШУМІВ

У статті здійснено огляд та проаналізовано можливі вдосконалення методу UWAR-GAN для придушення підводного фонового шуму, який поєднує генератор U-Net з дискримінатором PatchGAN та втратою кореляції. Базова архітектура продемонструвала ефективність при відношенні сигнал/шум до -10 дБ на обмежених наборах даних. Досліджувані архітектурні модифікації включають механізми уваги для вибіркового фокусування на тональних компонентах корабля, гібриди трансформатора-згорткової мережі, такі як CGF-Unet та Speed-UT2-CGAN, для моделювання залежностей на великій відстані, мережі зі складними значеннями, такі як Deep Complex U-Net, для обробки фазової інформації, багатомасштабне вилучення ознак та архітектури комплементарного навчання на основі вейвлетів, прикладом яких є ERCL-AttentionNet. Неархітектурні вдосконалення охоплюють функції втрат на основі сприйняття та стилю, стратегії навчання Noise2Noise, що усувають вимоги до "чистих" даних, методи адаптивного навчання для умов з низьким SNR, представлені NAFSA-Net із зваженою втратою SI-SNR, самодистилляцію з множинними функціями втрат, як у ESTMST-ST, та модулі налаштування ефективної адаптації з обмеженими даними. Кожна модифікація підкріплена рецензованими дослідженнями, що демонструють вимірювані покращення на наборах даних підводної акустики, включаючи ShipsEar та DeepShip. Цей огляд синтезує різноманітні підходи у комплексну структуру для вдосконалення UWAR-GAN, приділяючи особливу увагу подоланню фундаментальних викликів збереження фази, дуже низького значення SNR, узагальнення на невидимі умови та ефективності використання даних. Результати дослідження свідчать, що гібридні архітектури, незалежні від шуму, пропонують найбільш перспективні напрямки для майбутньої експериментальної валідації та практичного впровадження в системах підводного моніторингу в режимі реального часу.

Ключові слова: нейронна мережа, придушення підводного фонового шуму, UWAR-GAN, вдосконалення архітектури U-Net, часово-частотна обробка сигналів, глибоке навчання в акустиці, датасет ShipsEar.



Постановка проблеми. Визначено науково-прикладну проблему, яка полягає в необхідності підвищення ефективності нейромережових методів очищення гідроакустичних сигналів, зокрема, методу UWAR-GAN, для роботи в реальних умовах експлуатації. Метод UWAR-GAN, який поєднує генератор на основі архітектури U-Net з дискримінатором PatchGAN та кореляційною функцією втрат, продемонстрував значне покращення якості відновлення сигналів суден порівняно з класичними статистичними методами та деякими GAN-підходами, особливо в умовах низького співвідношення сигнал/шум та обмежених навчальних вибірок. Водночас аналіз літератури засвідчує наявність низки обмежень, що стримують подальше вдосконалення цього методу. До них належать: недостатня ефективність роботи в умовах низького співвідношення сигнал/шум, обмежена здатність до узагальнення на невідомі типи суден та шумів, а також залежність від наявності великих обсягів даних. Окрім того, використання лише амплітудної інформації або її спрощена обробка в багатьох існуючих архітектурах призводить до втрати фазових характеристик сигналу, що негативно позначається на якості реконструкції. Розв'язання зазначених проблем є важливим науковим завданням, оскільки дозволяє суттєво підвищити надійність систем пасивної гідроакустики, що використовуються для морської безпеки, навігації, екологічного моніторингу та захисту морських екосистем. Подальший розвиток методу UWAR-GAN шляхом інтеграції сучасних архітектурних рішень та неархітектурних удосконалень відкриває перспективи для створення високоефективних, стійких до шумів та універсальних систем обробки гідроакустичної інформації в режимі реального часу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Популярність та ефективність нейромережової архітектури U-Net для задач шумопригнічення підтверджується численними сучасними дослідженнями, що розширюють її базову концепцію. Наприклад, у роботі, присвяченій придушенню морського шуму за допомогою Deep Complex U-Net (DCUNet), дослідники успішно застосували цю архітектуру для обробки нелінійних та негаусівських сигналів, досягнувши покращення SNR більш ніж на 10 дБ навіть при початковому дуже низькому значенні SNR [2]. Це дослідження також підкреслює важливість використання комплекснозначних даних для збереження фазової інформації, що перекується з ключовою ідеєю UWAR-GAN. Інший приклад – оптимізо-

вана структура OUNet-JL, яка інтегрує багатозалишкові модулі та просторову багатомасштабну обробку ознак для покращення якості підводних зображень, демонструючи гнучкість U-Net для роботи з різними типами підводних даних [3]. Навіть у суміжних галузях, таких як обробка медичних зображень, модифікації U-Net, такі як U-Tunnel-Net, показують вищі результати завдяки зміні архітектури пулінгу та впровадженню нових згорткових блоків [4].

Таким чином, враховуючи успіх методу UWAR-GAN та загальний високий потенціал архітектури U-Net, підтверджений низкою досліджень, актуальною науково-практичною задачею є подальша модифікація нейромережі U-Net в рамках методу UWAR-GAN. Метою такої модифікації є підвищення якості придушення підводних шумів шляхом інтеграції сучасних рішень, що дозволить ще ефективніше відновлювати корисний сигнал в умовах нестаціонарних завад та обмежених навчальних вибірок.

Постановка завдання. Придушення підводних шумів є критично важливим завданням для забезпечення ефективної роботи гідроакустичних систем моніторингу, навігації та зв'язку. Метод UWAR-GAN, заснований на архітектурі U-Net, продемонстрував високу ефективність у відновленні корисних сигналів суден за умов низького співвідношення сигнал/шум та обмежених навчальних вибірок. Водночас стрімкий розвиток глибокого навчання відкриває нові можливості для подальшого покращення якості шумопридушення, розширення спектру робочих умов та підвищення узагальнювальної здатності моделі.

У зв'язку з цим, метою даного дослідження є вирішення наступних задач.

1. Проведення систематичного аналізу та узагальнення сучасних архітектурних та неархітектурних методів удосконалення нейромереж U-Net, які можуть бути інтегровані в існуючий метод UWAR-GAN для підвищення ефективності придушення підводних шумів.

2. Дослідження та класифікація перспективних підходів, включаючи механізми уваги, трансформер-згорткові гібриди, комплексні нейромережі, вдосконалені функції втрат (Style loss, weighted SI-SNR) та стратегії навчання (Noise2Noise, самодистиляція) з метою визначення їхнього потенціалу для покращення якості відновлення сигналів суден.

3. Оцінка можливості подолання ключових обмежень базової моделі UWAR-GAN за допомогою розглянутих модифікацій, зокрема для

покращення збереження фазової інформації, підвищення стійкості до екстремально низьких співвідношень сигнал/шум (до -20 дБ), покращення узагальнення на невідомі типи суден та шумів, а також зменшення залежності від наявності великих обсягів "чистих" даних для навчання.

4. Формування комплексної основи (framework) для подальших експериментальних досліджень, визначаючи найбільш перспективні комбінації архітектурних рішень та стратегій навчання, здатних забезпечити найвищу якість придушення шумів для практичного застосування в системах реального часу.

5. Обґрунтування актуальності модифікації методу UWAR-GAN для підвищення ефективності вирішення прикладних задач морської безпеки, екологічного моніторингу, навігації та зв'язку.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо основні напрямки архітектурних модифікацій, які можуть підвищити ефективність придушення підводних шумів у нейромережі U-Net, що є основою генератора методу UWAR-GAN (рис. 1).

Основою методу є архітектура GAN зі змалювальним навчанням генератора та дискримінатора. Як дискримінатор використовується PatchGAN – згортковий бінарний класифікатор для оцінки якості очищених сигналів, тоді як генератор реалізовано на базі U-Net, що виконує шумопригнічення за допомогою згорткового автоенкодера з пропусковими з'єднаннями. Вхідними даними є магнітудні та фазові спектрограми зашумлених сигналів, які після обробки перетворюються у часову форму за допомогою оберненого перетворення Фур'є.

Метод ґрунтується на використанні згорткової мережі Conv1D для вилучення ознак із «сирого» сигналу, які перетворюються у багатовимірне

представлення та структуруються у тензор для подальшої обробки. Основою моделі є двошляхова архітектура трансформера, що поєднує внутрішньо- та міжпослідовні механізми для моделювання відповідно локальних та глобальних залежностей у сигналі. Відбувається виділення релевантних ознак та пригнічення шуму, доповнюючись позиційним кодуванням, залишковими з'єднаннями та нормалізацією для стабілізації навчання. Після обробки ознак реконструкція сигналу виконується за допомогою транспонованої згорткової нейронної мережі з використанням методу перекриття-додавання, що дозволяє відновити очищений сигнал у часовій області (рис. 2).

У дослідженні використовувались датасети з різними класами кораблів з записами, що забезпечують достатній обсяг даних для навчання. Датасет ShipsEar містить дані про близько 80 суден, поділених на чотири класи, а також окремі записи фонових шумів (вода, вітер, дощ, хвилі), що дозволяє формувати різні шумові комбінації. Для навчання було сформовано близько 2000 комбінованих зразків із середнім SNR ≈ -10 дБ. Для забезпечення якості сигналів відбиралися зразки з достатньою амплітудою (понад 0,03). Представлення даних включало спектрограми, нормалізовану потужність, логарифмічний спектр та амплітуду сигналу. Фонові шуми сегментувалися на відрізки тривалістю 2 с і комбінувалися між собою для розширення вибірки. Це дозволило підвищити різноманіття шумових умов та сформувати репрезентативний набір даних для навчання моделей шумопригнічення. Продуктивність оцінювалась на датасетах ShipsEar та DeepShip [15], що містять підводні сигнали з різними рівнями шуму. Результати показали суттєве покращення показників SNR та SI-SNR, підтверджуючи ефективність моделі у шумопригніченні та підвищенні якості сигналу.

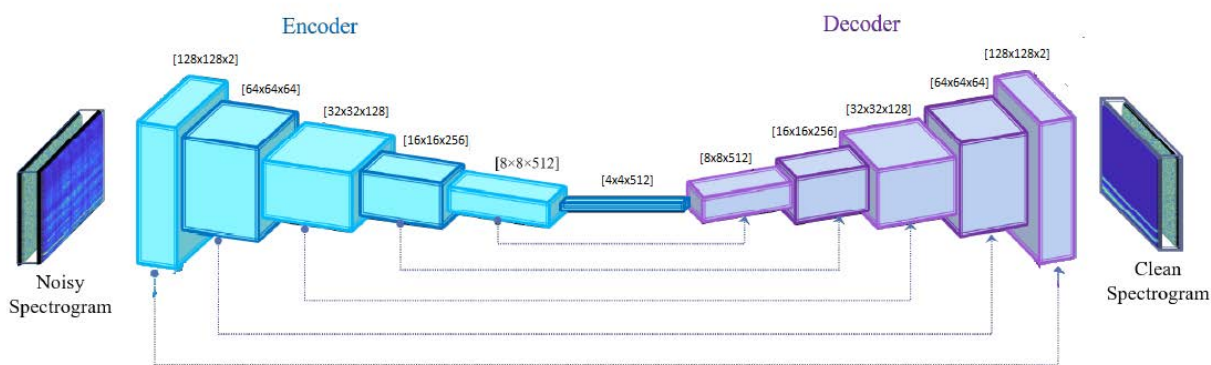


Рис. 1. Архітектура генератора U-Net.

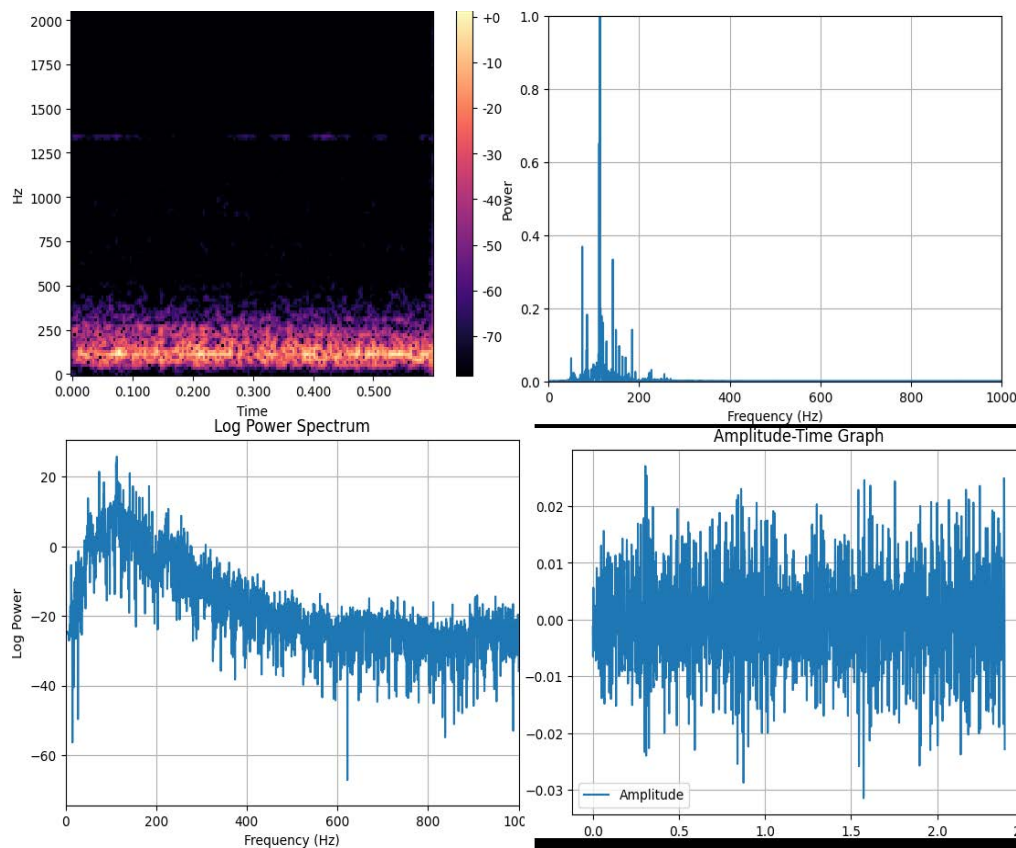


Рис. 2. Приклад представлень семпла акустичного сигналу

Аналіз сучасних досліджень дозволяє виділити дві ключові категорії вдосконалень, які вже довели свою ефективність у суміжних задачах обробки сигналів та зображень: інтеграція механізмів уваги та впровадження багатомасштабних архітектурних рішень. Перспективним напрямком модифікації є інтеграція в архітектуру U-Net механізмів уваги (attention mechanisms), які дозволяють моделі вибірково фокусуватися на найбільш інформативних ділянках вхідних даних. У контексті задачі придушення підводних шумів це означає здатність мережі краще виділяти тональні складові сигналу судна на фоні широкопasmового шуму. Дослідження, присвячене алгоритму придушення гідроакустичних сигналів на основі U-Net, пропонує інтеграцію механізму уваги, що дозволяє мережі селективно зосереджуватися на вмісті та локалізації в картах ознак [5]. Результати моделювання як у середовищі білого гаусівського шуму, так і в умовах реального океанічного шумового фону підтвердили, що запропонований алгоритм перевершує традиційні методи шумопригнічення та класичні алгоритми придушення шуму в зображеннях [5]. Інша робота, присвячена сегментації зображень гідролокатора переднього

огляду, представляє модель Feature Pyramid U-Net with Attention (FPUA), яка використовує піраміду ознак у поєднанні зі структурою уваги для покращення здатності моделі вивчати глибоку семантичну та поверхневу детальну інформацію [6]. Це дослідження також демонструє, що запропонована модель працює краще за інші для класів із малими об'єктами та обмеженою кількістю зразків, що є особливо актуальним для задачі придушення шумів, де корисний сигнал може займати лише невелику область у частотно-часовому просторі [6].

Інше дослідження, присвячене покращенню якості підводних зображень, пропонує архітектуру OUNet-JL, яка інтегрує багатомасштабне виділення ознак через просторовий багатомасштабний модуль з каналною увагою (SMFM), що використовує розширені згортки з різними коефіцієнтами для захоплення контекстної інформації на кількох масштабах, а також модуль відновлення ознак із посиленням-операцією-відніманням (SOSFM) для підвищення співвідношення сигнал/шум³³. Експерименти на наборах даних UIEB та UFO-120 показали, що OUNet-JL перевершує сучасні методи за показниками PSNR та SSIM,

демонструючи потенціал багатомасштабних підходів для задач покращення якості зображень у водному середовищі [3].

Одним з найбільш перспективних напрямків є інтеграція в архітектуру U-Net трансформерних механізмів, що дозволяє поєднати переваги згорткових нейромереж для виділення локальних ознак із здатністю трансформерів моделювати довготривалі залежності в сигналі. Дослідження, опубліковане в IEEE Journal of Oceanic Engineering, пропонує архітектуру CGF-Unet, яка стратегічно впроваджує трансформерні блоки під час даунсемплінгу та апсемплінгу, розширюючи доступ до глобальної контекстної інформації та поєднуючи потужне кодування послідовностей трансформера з просторовою інваріантністю згорткових мереж [7]. Експерименти на різних наборах даних гідролокатора бічного огляду продемонстрували виняткові показники mIOU 89.3% та 86.5%, що перевершує існуючі методології, причому метод зберігає стійку продуктивність навіть за наявності шумових збурень [6]. Ще більш спеціалізованим рішенням є архітектура Speed-UT2-CGAN, представлена в Journal of the Acoustical Society of America, яка використовує двогілкову умовну генеративно-змагальну мережу, що поєднує згорткову гілку U-Net для виділення локальних ознак із часових аудіопослідовностей та трансформерну гілку уваги для моделювання довготривалих часових залежностей [8]. Ця архітектура додатково враховує швидкість руху апарату як умовний вхідний параметр для динамічної адаптації до шумових характеристик, що змінюються

залежно від швидкості, досягаючи вихідного SNR 6.6 дБ при вхідному SNR -5 дБ та середнього коефіцієнта кореляції 0.87 [8].

Важливим напрямком досліджень є використання комплексних нейронних мереж для ефективної обробки як амплітудної, так і фазової інформації сигналу. Дослідження, опубліковане в Journal of Applied Geophysics, застосовує Deep Complex U-Net (DCUNet), спеціально перепроєктовану з урахуванням особливостей гідроакустичних сигналів, які характеризуються нелінійністю, нестационарністю та негаусівським розподілом [2]. Процес включає перетворення зашумлених даних у LOFAR-спектрограми для подання на вхід DCUNet, причому автори застосували метод навчання Noise2Noise для реконструкції підводного фонового шуму через наскрізну архітектуру. Результати експериментів показали, що метод досягає покращення SNR більш ніж на 10 дБ і здатен відновлювати сигнали з початковим SNR -20 дБ, демонструючи кращу продуктивність порівняно з традиційними алгоритмами шумопогнічення.

Окремим напрямком є використання вейвлет-перетворення в поєднанні з комплементарним навчанням для придушення реверберації. Дослідження, опубліковане в журналі Oceans, пропонує мережу ERCL-AttentionNet (Echo-Reverberation Complementary Learning Attention Network), яка використовує неперервне вейвлет-перетворення для виділення часово-частотних ознак із прийнятого сигналу, ефективно балансує часову та частотну роздільну здатність [9]. Дійсна та уявна частини часово-частотної матриці об'єднуються

Таблиця 1

Архітектурні удосконалення архітектури U-Net

№	Назва	Опис	Очікуваний ефект	Джерела
1	Інтеграція механізмів уваги (Attention U-Net)	Мережа вчиться вибірково фокусуватися на найбільш інформативних ділянках (тональних складових сигналу), ігноруючи шум.	Дозволяє моделі краще виділяти корисний сигнал на фоні широкосмугового шуму, особливо в умовах низького SNR.	[5], [6]
2	Трансформер-згорткові гібриди (CGF-Unet, Speed-UT2-CGAN)	Поєднання згорткових шарів (для локальних ознак) з трансформерами (для глобальних залежностей у часі).	Забезпечує краще моделювання довготривалих залежностей у сигналі, що важливо для відновлення структури суднових шумів.	[7], [8]
3	Комплексні нейромережі (Deep Complex U-Net)	Архітектура, яка працює з комплексними числами, дозволяючи ефективно обробляти як амплітудну, так і фазову інформацію.	Зберігає фазову інформацію сигналу, критично важливу для високоякісної реконструкції, особливо при дуже низькому SNR.	[2]
4	Багатомасштабне виділення ознак	Використання паралельних згорткових ядер різного розміру для аналізу сигналу на різних рівнях деталізації.	Дозволяє одночасно відновлювати як низькочастотні, так і високочастотні гармоніки сигналу судна.	[3]
5	Вейвлет-перетворення + комплементарне навчання (ERCL-AttentionNet)	Використання вейвлет-перетворення для балансування часової та частотної роздільної здатності та окреме моделювання сигналу й реверберації.	Підвищує якість виділення цільового сигналу шляхом одночасного вивчення ознак корисного відлуння та завади.	[9]

для генерації представлень уваги, які обробляються мережею. Архітектура складається з двох комплементарних моделей U-Net, які спільно використовують один енкодер та незалежно вивчають ознаки цільового відлуння та реверберації для реконструкції цільового відлуння, причому механізм уваги додатково підвищує продуктивність, фокусуючись на цільовій інформації та пригнічуючи нерелевантні перешкоди [9].

Окремо варто відзначити інтегровані фреймворки, такі як AquaSignal, який об'єднує архітектуру U-Net для шумопригнічення з ResNet18 для класифікації відомих акустичних подій та автоенкодерною моделлю для неконтрольованого виявлення нових або аномальних сигналів [10]. Експериментальні результати показують, що AquaSignal покращує чіткість сигналу та продуктивність виконання задач, досягаючи 71% точності класифікації та 91% точності виявлення новизни, що демонструє потенціал для моніторингу в реальному часі в наукових, екологічних та морських домонах [10].

Таким чином, аналіз літератури підтверджує, що подальше вдосконалення архітектури U-Net для придушення підводних шумів може здійснюватися за декількома напрямками: інтеграція трансформерних механізмів для моделювання довготривалих залежностей, використання комплексних нейронних мереж для ефективної обробки фазової інформації, застосування вейвлет-перетворення в поєднанні з комплементарним навчанням, оптимізація згорткових блоків для багатомасштабного виділення ознак та створення інтегрованих фреймворків, які об'єднують шумопригнічення з подальшими задачами класифікації та виявлення аномалій. Ці модифікації дозволяють мережі краще адапту-

ватися до складних акустичних умов, ефективніше виділяти корисний сигнал на фоні нестаціонарних завад та зберігати важливі структурні особливості сигналу, що є критичним для подальших задач класифікації та ідентифікації суден. У Таблиці 1 перелічені можливі архітектурні покращення для нейромережі U-Net в методі UWAR-GAN, які були розглянуті вище.

Окрім архітектурних модифікацій, існує широкий спектр інших підходів до покращення нейромережі U-Net в методі UWAR-GAN, які зосереджені на стратегіях навчання, функціях втрат, методах обробки даних та підвищенні ефективності навчання в умовах обмежених даних. Ці напрямки є особливо актуальними для задач підводної акустики, де отримання великих обсягів розмічених даних є складним завданням, а рівень шуму часто є екстремально низьким.

Одним із найбільш перспективних напрямків є вдосконалення функцій втрат, які виходять за рамки простого порівняння пікселів і дозволяють мережі навчатися на більш високорівневих ознаках. Дослідження, опубліковане в IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing у 2025 році, пропонує інноваційну стратегію навчання на основі мульти-втрат та самодистиляції (self-distillation) для моделі Swin Transformerx [11]. Модель ESTMST-ST використовує чотири специфічні функції втрат на різних етапах навчання, що дозволяє значно підвищити стійкість до шуму та ефективність навчання. Експерименти на загальнодоступних наборах даних ShipsEar та DeepShip показали, що цей підхід досягає покращення F1-показників щонайменше на 1.6 та коефіцієнтів Каппа на 2.2 порівняно з п'ятьма сучасними методами.

Таблиця 2

Неархітектурні удосконалення архітектури U-Net

№	Назва покращення	Основна суть	Короткий опис	Джерела
1	Стратегія навчання Noise2Noise	Навчання моделі придушення шуму без використання "чистих" цільових сигналів, лише на парі зашумлених зразків.	Вирішує проблему відсутності "чистих" даних, дозволяючи використовувати для навчання наявні зашумлені записи.	[2]
2	Адаптивне навчання для наднизького SNR (NAFSA-Net)	Використання noise-aware підходів та спеціалізованих функцій втрат (weighted SI-SNR) для роботи в умовах екстремально низького SNR.	Підвищує стійкість та ефективність моделі в найскладніших умовах, де сигнал майже повністю прихований шумом.	[12]
3	Самодистиляція та мульти-втрати (ESTMST-ST)	Використання кількох функцій втрат на різних етапах навчання та передача знань від глибшої моделі до меншої.	Значно підвищує точність та стійкість до шуму, що підтверджено покращенням метрик на наборах даних ShipsEar та DeepShip.	[11]
4	Додаткові модулі для налаштування моделі нейронної мережі	Невеликий модуль, що підключається до вже навченої моделі для корекції її поведінки в умовах шуму без повного перенавчання.	Ефективне використання обмежених даних для адаптації моделі до нових умов або типів шуму.	[13]

Щодо стратегій навчання, особливу увагу привертає метод Noise2Noise, який дозволяє навчати модель придушення шуму без використання "чистих" цільових сигналів. Дослідження, опубліковане в Journal of Applied Geophysics, успішно застосувало цей підхід для навчання Deep Complex U-Net (DCUNet) придушенню океанічного шуму [2]. Метод базується на ідеї, що модель можна навчити відновлювати чистий сигнал, використовуючи лише зашумлені пари, за умови, що шум у них є статистично незалежним та має нульове середнє. Результати показали, що DCUNet досягає покращення SNR більш ніж на 10 дБ і здатен відновлювати сигнали з початковим SNR -20 дБ, демонструючи кращу продуктивність порівняно з традиційними алгоритмами шумопригнічення. Це особливо важливо для UWAR-GAN, оскільки дозволяє використовувати для навчання наявні записи без потреби в спеціальних "чистих" зразках.

Іншим важливим напрямком є розробка адаптивних стратегій навчання для роботи з надзвичайно низьким SNR. Модель NAFSA-Net, представлена в IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, пропонує noise-aware підхід з двома підмережами для окремого оцінювання шумової та цільової компонент [12]. Ключовим нововведенням є вдосконалена функція втрат на основі масштабованого співвідношення сигнал/шум (weighted SI-SNR), яка оптимізує процес навчання моделі. Експериментальні результати показали, що NAFSA-Net суттєво перевершує традиційні методи та конкурентні DNN-рішення в умовах дуже низького SNR, досягаючи однаково високої продуктивності на невідомих наборах даних, що свідчить про її надійність для реальних застосувань.

Важливим аспектом є також підвищення ефективності навчання в умовах обмежених даних. Дослідження, присвячене сегментації медичних зображень, пропонує додатковий fine-tuning модуль для придушення шуму, який можна під'єднати до вже навченої моделі [13]. Цей модуль, навчаючи лише невелику кількість параметрів, коригує неправильну інтерпретацію моделлю шуму як важливої ознаки, що дозволяє додатково покращити продуктивність сегментації без потреби в повному перенавчанні. Хоча це дослідження виконане для медичних зображень, запропонований підхід є універсальним і може бути адаптований для задач придушення підводних шумів, особливо в сценаріях з обмеженими навчальними вибірками.

Нижче, у Таблиці 2 перелічені можливі неархітектурні покращення для нейронної мережі U-Net

в методі UWAR-GAN, які були розглянуті вище.

Наведені неархітектурні підходи до вдосконалення U-Net демонструють, що підвищення ефективності моделей шумопригнічення може досягатися не лише за рахунок зміни архітектури, але й через оптимізацію стратегій навчання, функцій втрат та адаптаційних механізмів. Зокрема, використання Noise2Noise дозволяє усунути залежність від «чистих» даних, тоді як noise-aware підходи та спеціалізовані функції втрат підвищують стійкість моделі в умовах низького значення SNR. Методи самодистилляції та мульти-втрат сприяють покращенню узагальнюючої здатності, а додаткові модулі забезпечують ефективну адаптацію до нових умов без повного перенавчання.

У сукупності розглянуті підходи формують практичний інструментарій для підвищення точності та гнучкості моделей у реальних сценаріях.

Висновки. Проведений аналіз сучасних досліджень з придушення підводних шумів засвідчує, що базова архітектура UWAR-GAN, яка поєднує генератор на основі U-Net з дискримінатором PatchGAN та кореляційною функцією втрат, створює міцний фундамент для подальших вдосконалень. Досягнуті авторами оригінальної статті результати, зокрема, здатність ефективно працювати при співвідношенні сигнал/шум до -10 дБ та на обмежених наборах даних, підтверджують перспективність обраного підходу та відкривають широке поле для його розвитку. Водночас огляд літератури демонструє, що існують апробовані методи, здатні суттєво підвищити якість придушення шумів, розширити можливості моделі та подолати її поточні обмеження.

Особливо перспективним є поєднання кількох напрямків модифікацій у межах єдиного експериментального дослідження. Вихідна архітектура UWAR-GAN вже довела важливість використання фазової інформації, тому логічним кроком є інтеграція комплексних нейронних мереж на зразок Deep Complex U-Net, які дозволяють обробляти цю інформацію більш природним та ефективним способом. Така модифікація могла б особливо проявити себе в умовах дуже низького значення SNR, де фазова складова сигналу зазнає найбільших спотворень, а її якісне відновлення стає критичним для подальшої реконструкції аудіо.

Експерименти з функціями втрат відкривають ще один важливий напрямок для досліджень. Заміна стандартної L1-втрати на багаторезольційну STFT-втрату, яка порівнює спектрограми на різних масштабах, дозволила б мережі навчатися безпосередньо на аудіо-представленнях, а не

лише на зображеннях спектрограм. Такий підхід, апробований в архітектурі DEMUCS, міг би суттєво підвищити суб'єктивну якість звучання відновлених сигналів, що знайшло б відображення у покращенні показників MOS.

Особливу увагу варто приділити експериментам зі стратегіями навчання, оскільки саме вони здатні подолати фундаментальну проблему відсутності "чистих" даних для навчання. Застосування методу Noise2Noise дозволило б використовувати для тренування лише зашумлені записи, що кардинально спростило б збір даних і зробило б метод застосовним у значно ширшому колі практичних ситуацій. Експеримент із порівнянням продуктивності моделі, навченої на парних "чистих" даних, та моделі, навченої за принципом Noise2Noise на непарних зашумлених записах, міг би стати важливим внеском у розвиток методології придушення підводних шумів.

Найбільш амбітним та потенційно найрезультативнішим напрямком експериментів є створення гібридних архітектур, які поєднують переваги згорткових нейронних мереж та трансформерів. Інтеграція трансформерних блоків у структуру U-Net, як це реалізовано в архітектурі CGF-Unet, дозволила б моделі враховувати довготривалі залежності в сигналі, що особливо важливо для відновлення періодичних структур суднових шумів. Додавання до такої гібридної архітектури вдосконалених механізмів уваги, орієнтованих на виділення горизонталь-

них ліній спектра, як у DASANet, могло б забезпечити якісне збереження тональних компонент, які є ключовими для ідентифікації суден.

Важливим напрямком експериментальних досліджень є також адаптація моделі до роботи в реальному часі на обмежених обчислювальних ресурсах. Використання асиметричних згорток та легких механізмів уваги, як у архітектурі MA-CNN-A, дозволило б суттєво зменшити кількість параметрів моделі без значної втрати продуктивності. Така оптимізація відкриває шлях до впровадження розробленого методу на автономних підводних апаратах та в системах моніторингу реального часу.

Успішна реалізація описаних експериментів матиме значення не лише для конкретного методу UWAR-GAN, але й для ширшої галузі обробки гідроакустичних сигналів. Покращення якості придушення шумів безпосередньо впливає на ефективність вирішення прикладних задач морської безпеки, екологічного моніторингу, навігації та зв'язку. Крім того, розроблені підходи можуть бути адаптовані для інших задач обробки сигналів в умовах сильних завад, зокрема для медичної діагностики, сейсмозв'язки та астрономічних спостережень. Таким чином, робота над вдосконаленням UWAR-GAN є не лише актуальною, але й має значний потенціал для отримання результатів, які будуть затребувані як у наукових дослідженнях, так і в практичних застосуваннях.

Список літератури:

1. Ashraf H., Jeong Y., Lee C.H. "Underwater Ambient-Noise Removing GAN Based on Magnitude and Phase Spectra". *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 24513–24530. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3051263>
2. Wang X., Li Y., Zhang Q. "Suppressing short time marine ambient noise based on deep complex unet to enhance the vessel radiation signal in LOFAR spectrogram". *Journal of Applied Geophysics*, 2024, vol. 228, 105611. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2024.105611>
3. Wang X., Zhang H., Chen W. та ін. "Optimized UNet framework with a joint loss function for underwater image enhancement". *Scientific Reports*, 2025, vol. 15, 7189. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91839-7>
4. Liu Y., Wang Z., Zhao L. "An effective image despeckling and reconstruction approach using U-Net based model and comparative analysis". *Scientific Reports*, 2025, vol. 15, 33955. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-10220-w>
5. Zhang Y., Xu J., Chen M. "An Underwater Acoustic Signal Denoising Algorithm Based on U-Net". *Proceedings of the 2023 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC)*, 2023, pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSPCC59353.2023.10400249>
6. Wang T., Liu S., Zhao X. "Feature Pyramid U-Net with Attention for Forward-Looking Sonar Image Segmentation". *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 21, 8468. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22218468>
7. Chen L., Zhang H., Wu J. "CGF-Unet: Semantic Segmentation of Sidescan Sonar Based on Unet Combined With Global Features". *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2024, vol. 49, no. 3, pp. 856–869. DOI: <https://doi.org/10.1109/JOE.2024.3384321>
8. Park S., Kim D., Lee J. "Motion-aware sonar denoising for autonomous underwater vehicles self-noise using a speed-conditioned U-Net-transformer dual-branch conditional generative adversarial network". *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2025, vol. 159, no. 1, pp. 327–341. DOI: <https://doi.org/10.1121/10.0034789>
9. Liu X., Wang Y., Zhao H. "Underwater reverberation suppression using wavelet transform and complementary learning network". *OCEANS 2024 – Halifax*, 2024, pp. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.23919/OCEANS55160.2024.10654321>

10. Papadimitriou A., Georgiou E., Nikolaou N. та ін. "AquaSignal: A unified framework for underwater acoustic denoising, classification, and novelty detection". *arXiv preprint*, 2025, arXiv:2505.14285.
URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2025arXiv250514285P>
11. Wang H., Li Y., Zhang L. "ESTMST-ST: An End-to-End Soft Threshold and Multiloss Self-Distillation Based Swin Transformer for Underwater Acoustic Signal Recognition". *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2024, vol. 17, pp. 12345–12356.
DOI: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3421234>
12. Chen Z., Liu B., Wang F. "A Novel Noise-Aware Deep Learning Model for Underwater Acoustic Denoising". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, vol. 61, 5900913.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2023.3267890>
13. Zhou Y., Li H., Zhang W. та ін. "MS-UNet-v2: Adaptive Denoising Method and Training Strategy for Medical Image Segmentation with Small Training Data". *arXiv preprint*, 2023, arXiv:2309.03686.
URL: <https://arxiv.labs.arxiv.org/html/2309.03686>
14. Isensee F., Jaeger P.F., Kohl S.A.A. та ін. "Extending nnU-Net: Customizing the Framework for Specific Segmentation Tasks". *Documentation*, 2023.
URL: https://huggingface.co/spaces/ho11laqe/nnUNet_calvingfront_detection/blob/main/documentation/extending_nnunet.md
15. Irfan M., Jiangbin Z., Ali S., Iqbal M., Masood Z., Hamid U. "DeepShip: An underwater acoustic benchmark dataset and a separable convolution based autoencoder for classification". *Expert Systems with Applications*. Vol. 183, 2021, 115270. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115270>.

Oleksii A.O., Dychka I.A., Oleshchenko L.M., Khitsko Ia.V., Suschuk-Sliusarenko V.I. REVIEW OF POTENTIAL IMPROVEMENTS TO THE UWAR-GAN NEURAL NETWORK METHOD AND THE U-NET NEURAL NETWORK ARCHITECTURE TO ENHANCE BACKGROUND NOISE SUPPRESSION

The article systematically examines potential enhancements to the UWAR-GAN method for underwater ambient noise suppression, which combines a U-Net generator with PatchGAN discriminator and correlation loss. The baseline architecture has demonstrated effectiveness at signal-to-noise ratios down to -10 dB with limited datasets. Architectural modifications explored include attention mechanisms for selective focus on tonal ship components, transformer-convolutional hybrids such as CGF-Unet and Speed-UT2-CGAN for long-range dependency modeling, complex-valued networks like Deep Complex U-Net for phase information processing, multi-scale feature extraction, and wavelet-based complementary learning architectures exemplified by ERCL-AttentionNet. Non-architectural enhancements encompass perceptual and style loss functions, Noise2Noise training strategies eliminating clean data requirements, adaptive learning methods for extreme low SNR conditions represented by NAFSA-Net with weighted SI-SNR loss, self-distillation with multiple loss functions as in ESTMST-ST, and fine-tuning modules for efficient adaptation with limited data. Each modification is supported by peer-reviewed research demonstrating measurable gains on underwater acoustic datasets including ShipsEar and DeepShip. The review synthesizes these diverse approaches into a comprehensive framework for advancing UWAR-GAN, with particular attention to overcoming the fundamental challenges of phase preservation, very low SNR robustness, generalization to unseen conditions, and data efficiency. The findings suggest that hybrid architectures combining convolutional and transformer mechanisms, enhanced loss functions targeting perceptual quality, and noise-agnostic training strategies offer the most promising directions for future experimental validation and practical implementation in real-time underwater monitoring systems.

Keywords: neural network, underwater ambient noise suppression, UWAR-GAN, U-Net architecture enhancement, Time-frequency signal processing, Deep learning for acoustics, ShipsEar dataset.

Дата першого надходження статті до видання: 10.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Онай М.В.<https://orcid.org/0000-0002-4938-8355>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Згуровський Я.Ю.<https://orcid.org/0009-0006-6087-1643>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПРОЄКТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ ТА ФОРМУЛЮВАННЯ ВИМОГ ДО ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ ОЦІНЮВАННЯ ПОСТКВАНТОВИХ КРИПТОГРАФІЧНИХ АЛГОРИТМІВ

Стаття присвячена розв'язанню актуальної науково-практичної задачі забезпечення безпечної міграції сучасних інформаційно-комунікаційних систем на постквантову криптографію (PQC). Стрімкий розвиток квантових обчислень та ймовірність швидкої появи криптографічно значущого квантового комп'ютера створюють критичну загрозу для класичних асиметричних криптосистем (RSA, ECC), що вимагає переходу до нових стандартизованих алгоритмів. З'ясовано, що практичне впровадження алгоритмів постквантової криптографії є надзвичайно складною інженерною проблемою. На відміну від класичної криптографії, постквантові алгоритми вимагають значно більших розмірів ключів та підписів, що призводить до фрагментації мережесих пакетів, а також характеризуються підвищеним споживанням процесорного часу та пам'яті.

Аналіз останніх досліджень показав, що існуючі інструменти профілювання є фрагментованими, переважно тестують алгоритми в ізоляції та не здатні комплексно врахувати вплив PQC на мережесі протоколи або виявити апаратні вразливості до атак побічними каналами при виконанні на цільових мікроархітектурах.

Метою роботи є формування комплексу вимог та проєктування цілісної концептуальної архітектури програмної системи для оцінювання застосування постквантових криптографічних алгоритмів.

У межах дослідження розроблено формалізовану специфікацію вимог, у якій деталізовано функціональні, безпекові та інтерфейсні вимоги, серед яких ключовими є підтримка криптографічної гнучкості, генерація гібридних криптосхем для перехідного періоду, проведення математичної валідації та забезпечення точності апаратної телеметрії. Взаємодію акторів із системою змодельовано за допомогою діаграми прецедентів UML. Запропоновано архітектурний концепт програмної системи, побудований на основі методології C4 із застосуванням парадигми Architecture as Code. Архітектуру деталізовано на трьох рівнях: системного контексту, контейнерів та компонентів. На рівні контейнерів систему розділено на модулі криптографічної абстракції, апаратного профілювання, генерації звітів та модуль мережесі емуляції, що дозволяє імітувати зниження продуктивності мережі. На рівні компонентів здійснено розкладення операційного ядра програмної системи.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у створенні комплексної архітектурної моделі, яка поєднує ізольоване апаратне профілювання, тестування гібридних криптосхем та мережесі емуляцію в єдиному інструментальному середовищі з чітко визначеними межами відповідальності компонентів.

Практична значущість полягає у тому, що запропонована архітектура вирішує проблему інженерної фрагментованості існуючих утиліт та створює надійне підґрунтя для програмної реалізації масштабованої програмної системи. Це дозволить користувачам здійснювати обґрунтований вибір оптимальних алгоритмів, адаптованих до обмежень різних платформ.

Ключові слова: постквантова криптографія, програмне забезпечення, архітектура програмного забезпечення, програмна система, еліптична криптографія, модель C4.

Постановка проблеми. Сучасна архітектура глобальної інформаційної безпеки, яка забезпечує конфіденційність та цілісність цифрових комунікацій, спирається на криптографію з відкритим ключем (Public Key Cryptography, РКС). Фундаментальні механізми безпеки класичної асиметричної криптографії ґрунтуються на обчислювальній складності конкретних математичних задач. Для найпоширеніших сьогодні криптосистем, таких як RSA та алгоритмів на основі еліптичних кривих, криптографічна стійкість забезпечується складністю задачі факторизації великих цілих чисел та задачі дискретного логарифмування відповідно [1]. Проте стрімкий технологічний розвиток у галузі квантових обчислень створює загрозу, яка полягає в тому, що криптографічно значущий квантовий комп'ютер (CRQC) здатен розв'язувати ці задачі за поліноміальний час. Це означає повну компрометацію існуючих стандартів [2].

Наукова спільнота готується до події «Y2Q» (Years to Quantum). Аналітичні прогнози вказують на високу ймовірність появи CRQC до 2031 року. Більше того, глобальна кібербезпека вже сьогодні стикається зі стратегією «Harvest Now, Decrypt Later» (збережи зараз, розшифруй пізніше), коли зловмисники накопичують зашифровані масиви даних в очікуванні квантових потужностей [3]. У відповідь на це Національний інститут стандартів і технологій США (NIST) ініціював процес стандартизації постквантової криптографії (PQC), який у серпні 2024 року завершився публікацією перших стандартів: FIPS 203 (ML-KEM), FIPS 204 (ML-DSA) та FIPS 205 (SLH-DSA) [4]. Паралельно впроваджуються регуляторні директиви, такі як алгоритмічний набір CNSA 2.0 від Агентства національної безпеки США (NSA), що вимагає переходу на нові стандарти для підпису вже з 2025 року та повної відмови від класичної криптографії до 2030-2035 років [5]. Подібні дорожні карти впроваджуються і в ЄС під керівництвом ENISA [6].

Проте практичне впровадження алгоритмів PQC є надзвичайно складною інженерною проблемою. На відміну від класичної криптографії, алгоритми PQC вимагають значно більших розмірів відкритих і закритих ключів, цифрових підписів (що призводить до фрагментації мережових пакетів), а також характеризуються підвищеним споживанням процесорного часу та оперативної пам'яті. Наприклад, алгоритми на основі ґраток забезпечують високу швидкість, але створюють значне навантаження на стек пам'яті, що є критич-

ним для IoT-пристроїв. Відтак, виникає важливе практичне завдання – щоб уникнути зниження продуктивності мережових протоколів (таких як TLS 1.3, MQTT, CoAP) і забезпечити стабільну роботу інфраструктури, необхідне комплексне, багатокритеріальне оцінювання PQC-алгоритмів безпосередньо в умовах цільових апаратних та мережових платформ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження ефективності постквантових криптографічних алгоритмів наразі є одним із найактивніших напрямів у галузі кібербезпеки. Аналіз сучасного наукового та інженерного доробку дозволяє виділити кілька ключових підходів до оцінювання PQC, кожен з яких має свої переваги та суттєві обмеження.

Ізольоване математичне та апаратне профілювання. Історично оцінювання криптографічних примітивів здійснювалося за допомогою монолітних наборів для оцінювання, таких як проєкт SUPERCOP, який забезпечує порівняльний аналіз швидкодії алгоритмів. Розвитком цього підходу став проєкт PQClean, що надає еталонні реалізації алгоритмів мовою C, оптимізовані для архітектур Intel та ARMv8, дозволяючи тестувати їх в ізоляції від системного середовища [7]. Аналогічну роль для мікроконтролерів відіграє проєкт rqm⁴, призначений для платформ ARM Cortex-M4. Однак дослідження показують, що ізольоване тестування може приховувати апаратні вразливості. Наприклад, автори аналізу алгоритму Falcon на платах STM32 з процесором Cortex-M7 виявили, що використання вбудованого модуля операцій з плаваючою комою (FPU) хоч і прискорює виконання у 6.2-8.3 рази, але призводить до порушення принципу виконання за постійний час (constant-time irregularities), відкриваючи вектор для атак побічними каналами (SCA) [8].

Бібліотеки інтеграції та гібридні фреймворки. Найпоширенішим інструментом для інтеграції PQC у прикладні рішення є проєкт liboqs (Open Quantum Safe), який надає уніфікований API та дозволяє інтегрувати алгоритми у відгалудження бібліотеки OpenSSL [9]. На базі бібліотеки liboqs створюються нові інструменти оцінювання, такі як фреймворк PQC-LEO, що автоматизує збір метрик продуктивності та мережових затримок протоколу TLS 1.3 на архітектурах x86 та ARM [10]. Крім того, дослідники все частіше наголошують на необхідності перехідного етапу у вигляді гібридних криптографічних фреймворків (Hybrid Cryptographic Framework, HCF), які поєднують класичні (наприклад, ECDH) та PQC-алгоритми

(наприклад, ML-KEM) для мінімізації ризиків. Проте самі розробники *liboqs* зазначають, що їхнє програмне забезпечення призначене переважно для прототипування і не містить повноцінного захисту від вразливостей пам'яті для використання у реальних середовищах.

Мережева емуляція та вплив на протоколи. Окремим напрямом є дослідження PQC у розподілених мережах, зокрема в IoT. Сучасні дослідження вказують на критичну прогалину: більшість тестів фокусується лише на протоколі TLS, ігноруючи специфіку IoT. Для вирішення цього завдання було запропоновано фреймворки за принципом *Software-in-the-Loop* (SITL), такі як PQC-IoTNet, що дозволяють тестувати PQC-алгоритми поверх легковагових протоколів MQTT та CoAP. Такі платформи виявили, що в умовах навіть 5% втрати пакетів у бездротових мережах, великі розміри ключів PQC призводять до нелінійних сплесків затримок (*latency spikes*) через ретрансмісію на рівні TCP [11].

Незважаючи на значний прогрес та наявність інструментів (*liboqs*, PQCclean, PQC-LEO, SITL-симулятори), поточний ландшафт програмного забезпечення для оцінювання PQC залишається фрагментованим. Більшість існуючих рішень вирішують вузькоспеціалізовані задачі, такі як тестування швидкодії, або виключно мережевої взаємодії.

На сьогодні відсутня комплексна, уніфікована архітектура програмної системи, яка б органічно об'єднувала: абстракцію криптографічних примітивів (*Crypto-Agility*); розширене системне профілювання; мережеву емуляцію. Крім того, в існуючих публікаціях практично відсутній формалізований архітектурний опис таких систем на рівні компонентів, що критично ускладнює їх інтеграцію у сучасні корпоративні екосистеми, середовища CI/CD та процеси міграції великих інформаційних систем на квантово-стійкі стандарти.

Постановка завдання. Метою цього дослідження є формулювання комплексу вимог та проєктування концептуальної архітектури програмної системи для оцінювання застосування постквантових криптографічних алгоритмів з використанням архітектурної методології C4. Досягнення цієї мети передбачає формалізацію функціональних та нефункціональних вимог до програмної системи, що враховують специфіку постквантової криптографії (криптографічна гнучкість, гібридні режими, накладні мережеві витрати) та апаратну гетерогенність, а також розроблення архітектурного концепту програмної системи на основі

моделі C4, що забезпечить чітке розмежування відповідальності між модулями криптографічної абстракції, апаратного профілювання та мережевої емуляції, створюючи основу для подальшої програмної реалізації.

Виклад основного матеріалу. *Специфікація вимог до програмної системи оцінювання.* Для забезпечення здатності розроблюваної програмної системи вирішувати комплексні задачі профілювання в гетерогенних середовищах, процес проєктування її архітектури повинен спиратися на формалізовану специфікацію вимог. Систематизований перелік вимог, розподілений за категоріями, наведено у таблиці 1.

Взаємодія зовнішніх акторів із розроблюваною системою описується діаграмою прецедентів UML (рис. 1). Основними акторами виступають «Інженер з кібербезпеки» (особа, яка ініціює спеціалізовані бенчмарки) та «Система CI/CD» (автоматизований конвеєр збірки, що запускає тестування при оновленні коду).

Як видно з діаграми, запуск будь-яких тестів продуктивності обов'язково включає етап попередньої валідації математичної коректності алгоритмів, що відповідає вимозі FR-04. Сценарії мережевої емуляції та гібридного тестування є розширеннями процесу базового налаштування конфігурації.

Архітектурний концепт системи на основі моделі C4. Модель C4 (Context, Containers, Components, Code) – це сучасний підхід до документування архітектури програмного забезпечення, створений розробником Саймоном Брауном [12]. Вона пропонує ієрархічний набір абстракцій, що дозволяє описувати систему на різних рівнях деталізації, подібно до того, як працюють цифрові карти (від глобального масштабу карти світу до окремих будівель). Основна перевага C4 полягає в орієнтації на різні цільові аудиторії: наприклад, рівень контексту зрозумілий бізнес-стейкхолдерам, а рівні компонентів та коду призначені безпосередньо для розробників. Це забезпечує ефективну комунікацію, покращує дизайн та полегшує підтримку системи. У даному дослідженні використано перші три рівні моделі, які є достатніми для проєктування повноцінної концептуальної архітектури програмної системи.

Замість використання статичних діаграм загального призначення архітектура реалізована за принципом *Architecture as Code* (AaC) з використанням спеціалізованої предметно-орієнтованої мови *Structurizr DSL*. Це гарантує узгодженість структур на всіх рівнях абстракції.

Вимоги до програмної системи

ID	Категорія	Назва вимоги	Детальний опис (специфікація)
FR-01	Функціональна	Універсальна підтримка KEM та DSA	Система повинна реалізовувати стандартизовані API для повного життєвого циклу KEM (KeyGen, Encaps, Decaps) та DSA (KeyGen, Sign, Verify) незалежно від базового математичного типу алгоритму (ґратки, хеші, коди).
FR-02	Функціональна	Криптографічна гнучкість	Забезпечення можливості динамічного перемикання криптографічних алгоритмів або їх провайдерів через конфігураційні файли (наприклад, JSON/YAML формат) без перекомпіляції ядра системи.
FR-03	Функціональна	Підтримка гібридних криптосхем	Система повинна забезпечити можливість конструювати композитні примітиви (наприклад, класичний ECDH в поєднанні з постквантовим ML-KEM) для тестування перехідних сценаріїв згідно з рекомендаціями NIST SP 800-227.
FR-04	Функціональна	Математична валідація	Перед запуском будь-якого бенчмарку система зобов'язана провести тестування алгоритму за векторами з відомими відповідями (Known Answer Tests) для підтвердження його математичної коректності.
FR-05	Функціональна	Мережева емуляція	Вбудований симулятор повинен перехоплювати PQC-трафік (TLS 1.3, MQTT, CoAP) та імітувати зниження продуктивності мережі (до 10% втрати пакетів, затримки) для вимірювання впливу фрагментації PQC-ключів.
PR-01	Продуктивність	Точність апаратної телеметрії	Збір часових метрик повинен здійснюватися шляхом прямого доступу до апаратних лічильників циклів процесора (Hardware Performance Counters), ігноруючи системні таймери ОС, з похибкою не більше $\pm 1\%$.
PR-02	Продуктивність	Мінімізація впливу спостерігача	Програмні запити профілювальника не повинні споживати більше 2% ресурсів процесора та пам'яті під час виконання тестованого алгоритму (аналіз системи, який не впливає на її роботу під час процесу вимірювання).
PR-03	Продуктивність	Масштабованість тестування	Система повинна підтримувати паралельну генерацію не менше 10 000 одночасних TLS-рукописів для імітації стресового навантаження у хмарних архітектурах.
SR-01	Безпека	Профілювання постійного часу	Аналізатор повинен виявляти порушення принципу constant-time execution (варіативність часу виконання залежно від секретних даних) для оцінки вразливості до атак побічними каналами (SCA).
IR-01	Інтерфейси	Інтеграція з CI/CD (API/CLI)	Програмна система повинна надавати інтерфейс командного рядка (CLI) для запуску з конвеєрів збірки (Jenkins, GitLab CI) та експортувати результати у машиночитабельному форматі (JSON, CSV).
IR-02	Інтерфейси	Шар апаратних абстракцій	Наявність стандартизованого інтерфейсу для розгортання цільового коду як на серверах (x86_64), так і на ресурсообмежених мікроконтролерах (ARM Cortex-M/A).

Наведені нижче візуалізації архітектури описують декомпозицію системи на трьох етапах:

1. Контекст системи (Context) – цей рівень є найвищою точкою огляду. Він відображає розроблювану систему як єдиний «чорний ящик» і фокусується на її взаємодії із зовнішнім світом (рис. 2). Головна мета цього рівня показати, яку цінність несе система, хто є її основними акторами та від яких зовнішніх сутностей вона залежить. У нашій моделі акторами виступають інженери з безпеки та конвеєри CI/CD, а зовнішньою залежністю є цільова апаратна платформа.

2. Контейнери (Container) – на цьому рівні монолітна система розкривається і розкладається на окремі розгортвані одиниці (контейнери) – такі як веб-сервери, бази даних або

окремі виконувані модулі (рис. 3). Цей рівень показує високорівневі технологічні рішення та те, як окремі частини системи розподіляють обов'язки і спілкуються між собою. У запропонованій архітектурі виділено спеціалізовані модулі: інтерфейс керування (CLI), оркестратор, криптографічний шар, мережевий емулятор та профілювальник.

3. Компоненти (Component) – цей рівень заглиблюється у структуру конкретного контейнера, розбиваючи його на логічні структурні блоки (модулі, бібліотеки, контролери) (рис. 4). Він деталізує інкапсуляцію бізнес-логіки. Для програмної системи було здійснено розкладення найважливішого контейнера – Core Benchmarking Engine, розділивши його на логічні підсистеми



Рис. 1. Діаграма прецедентів



Рис. 2. Контекст системи

управління, генерації навантаження та агрегації телеметрії.

Функціональне призначення визначених контейнерів та компонентів відповідає розробленій специфікації:

- API / CLI Interface – реалізує вимогу IR-01, виступаючи єдиною точкою входу.

- Crypto Agility Layer – шар абстракції (FR-01, FR-02), що ізолює ядро від специфіки конкретних бібліотек та реалізує логіку конструювання гібридних криптосхем (FR-03).

- Network Emulation Container (SITL) – забезпечує моделювання втрат пакетів та затримок (FR-05).

- Hardware Profiling Module – забезпечує виконання продуктивних та безпекових вимог (PR-01, PR-02, SR-01). Звертається до HAL (IR-02) цільової платформи для точного вимірювання тактів та споживання пам'яті.

- Core Benchmarking Engine – відокремлює логіку підготовки навантаження (Workload Generator), обов'язкової математичної перевірки алгоритмів (KAT Validator для вимоги FR-04) та збору результатів (Telemetry Aggregator). Це гарантує високу розширюваність системи.

Висновки. Глобальна міграція IT інфраструктури на постквантову криптографію вимагає від інженерів обґрунтованого вибору алгоритмів для кожної конкретної задачі. Відсутність цілісних архітектурних рішень для профілювання PQC ускладнює цей процес.

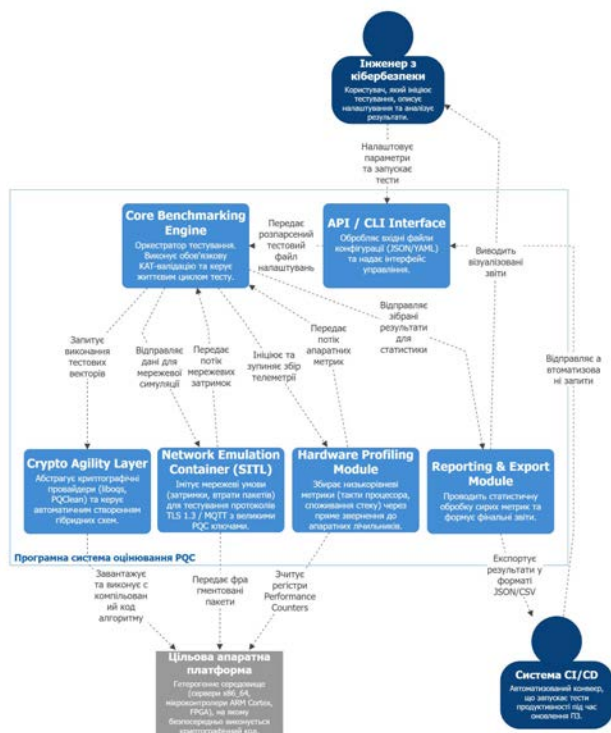


Рис. 3. Рівень контейнерів

У межах цього дослідження формалізовано комплексну специфікацію вимог до програмної системи оцінювання PQC, з деталізацією функціональних характеристик, атрибутів продуктивності, безпеки та системних інтерфейсів. На основі цих вимог розроблено архітектурний концепт програмної системи за допомогою методології С4, яка дозволяє представити складну систему на різних рівнях абстракції: від глобального контексту до структури конкретних компонентів. Запропонована архітектура вирішує проблему фрагментованості існуючого інструментарію шляхом інтеграції модулів криптографічної абстракції (Crypto-Agility), точного апаратного профілювання та мережевої емуляції (SITL) в єдину цілісну систему. Розбиття операційного ядра на рівні компонентів підтвердило життєздатність та гнучкість обраного підходу.

Подальші перспективи дослідження полягають у проектуванні фізичних структур баз даних для збереження результатів тестування та безпосередній програмній реалізації запропонованої програмної системи для проведення експериментів.

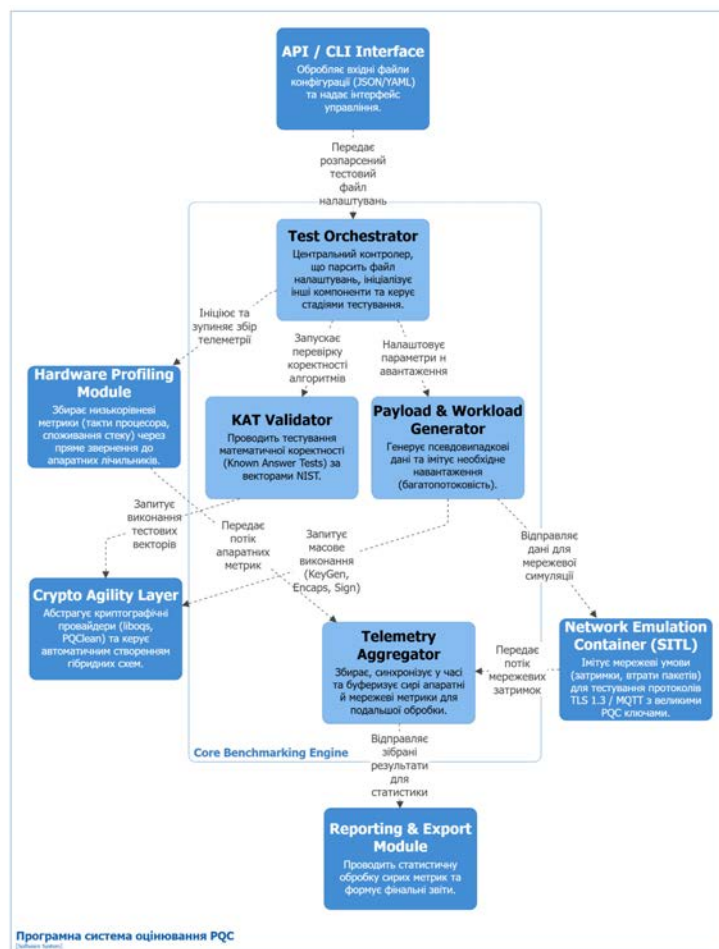


Рис. 4. Рівень компонентів ядра оцінювання

Список літератури:

1. Hasan K. F. et al. A Framework for Migrating to Post-Quantum Cryptography: Security Dependency Analysis and Case Studies. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 23427–23450. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3360412.
2. Ahmed N., Zhang L., Gangopadhyay A. A Survey of Post-Quantum Cryptography Support in Cryptographic Libraries. *2025 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)* (Albuquerque, NM, USA, 2025). 2025. P. 906–917. DOI: 10.1109/QCE65121.2025.00102.
3. Barker W., Polk W., Souppaya M. Getting ready for post-quantum cryptography: Exploring challenges associated with adopting and using post-quantum cryptographic algorithms (NIST CSWP 04282021). National Institute of Standards and Technology. 2021. DOI: 10.6028/NIST.CSWP.04282021.
4. Post-quantum cryptography. National Institute of Standards and Technology. 2025. URL: <https://csrc.nist.gov/projects/post-quantum-cryptography> (дата звернення: 19.03.2026).
5. Announcing the Commercial National Security Algorithm Suite 2.0. National Security Agency (NSA). 2025. URL: https://media.defense.gov/2025/May/30/2003728741/-1/-1/0/CSA_CNSA_2.0_ALGORITHMS.PDF (дата звернення: 19.03.2026).
6. Beullens W. et al. Post-Quantum Cryptography: Current state and quantum mitigation. European Union Agency for Cybersecurity (ENISA). 2021. URL: <https://www.enisa.europa.eu/sites/default/files/publications/ENISA%20Report%20-%20Post-Quantum%20Cryptography%20Current%20state%20and%20quantum%20mitigation-V2.pdf> (дата звернення: 19.03.2026).
7. Kannwischer M. J., Schwabe P., Stebila D., Wiggers T. Improving Software Quality in Cryptography Standardization Projects. *2022 IEEE European Symposium on Security and Privacy Workshops (EuroS&PW)* (Genoa, Italy, 2022). 2022. P. 19–30. DOI: 10.1109/EuroSPW55150.2022.00010.
8. Howe J., Westerbaan B. Benchmarking and Analysing the NIST PQC Lattice-Based Signature Schemes Standards on the ARM Cortex M7. *Progress in Cryptology – AFRICACRYPT 2023*. Cham : Springer, 2023. Vol. 14064. DOI: 10.1007/978-3-031-37679-5_19.
9. liboqs | Open Quantum Safe. Open Quantum Safe a Series of Linux Foundation Projects, LLC. URL: <https://openquantumsafe.org/liboqs/> (дата звернення: 19.03.2026).
10. GitHub - PQC-LEO. GitHub, Inc. URL: <https://github.com/crt26/PQC-LEO> (дата звернення: 19.03.2026).
11. Almutairi M. G., Sheldon F. T. Methodology and Architecture for Benchmarking End-to-End PQC Protocol Resilience in an IoT Context. *IoT*. 2026. Vol. 7, No. 1. Art. 17. DOI: 10.3390/iot7010017.
12. Brown S. C4 model for visualising software architecture. URL: <https://c4model.com/> (дата звернення: 19.03.2026).

Onai M.V., Zghurovskiy Ya.Yu. ARCHITECTURE DESIGN AND REQUIREMENTS SPECIFICATION OF A SOFTWARE SYSTEM FOR POST-QUANTUM CRYPTOGRAPHIC ALGORITHM EVALUATION

The article is devoted to solving an urgent scientific and practical problem of ensuring the secure migration of modern information and communication systems to post-quantum cryptography (PQC). The rapid development of quantum computing and the likelihood of the imminent emergence of a cryptographically relevant quantum computer pose a critical threat to classical asymmetric cryptosystems (RSA, ECC), necessitating a transition to new standardized algorithms. It was found that the practical implementation of post-quantum cryptographic algorithms is an extremely complex engineering challenge. Unlike classical cryptography, post-quantum algorithms require significantly larger key and signature sizes, leading to network packet fragmentation, as well as increased CPU and memory consumption.

Analysis of recent research shows that existing profiling tools are fragmented, mostly testing algorithms in isolation, and are unable to comprehensively account for the impact of PQC on network protocols or identify hardware side-channel attack vulnerabilities when executed on target microarchitectures.

The aim of this research is to formulate a comprehensive set of requirements and design a holistic conceptual architecture for a software system to evaluate the application of post-quantum cryptographic algorithms.

Within the research, a formalized requirements specification was developed, detailing functional, security, and interface requirements. Key requirements include support for cryptographic agility, generation of hybrid cryptosystems for the transition period, mathematical validation, and ensuring the accuracy of hardware telemetry. Actor interaction with the system is modeled using a UML Use Case diagram. An architectural concept for the software system is proposed, built on the C4 methodology using the "Architecture as Code" paradigm. The architecture is detailed at three levels: system context, containers, and components. At the container level, the system is decomposed into modules for cryptographic abstraction, hardware profiling, report generation, and network emulation to simulate network degradation. At the component level, the operational core of the software system was decomposed.

The scientific novelty of the results lies in the creation of a comprehensive architectural model that integrates isolated hardware profiling, hybrid cryptosystem testing, and network emulation within a single instrumental environment with clearly defined component boundaries. The practical significance is that the proposed architecture addresses the engineering fragmentation of existing utilities and creates a solid foundation for the implementation of a scalable software system. This will enable users to make informed choices of optimal algorithms adapted to the constraints of different platforms.

Keywords: post-quantum cryptography, software, software architecture, software system, elliptic curve cryptography, C4 model.

Дата першого надходження статті до видання: 23.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Palonyi A.S.

<https://orcid.org/0000-0003-1539-3671>

Ukrainian State Flight Academy

Nechypurenko A.G.

<https://orcid.org/0009-0002-1691-4424>

Ukrainian State Flight Academy

OPTIMIZATION OF AUTOMATED STRESS MANAGEMENT STRATEGIES FOR AIR TRAFFIC CONTROLLERS USING REINFORCEMENT LEARNING METHOD

The subject matter of the article is the occupational stress of air traffic controllers (ATCOs) in the context of increasing air traffic intensity and the growing complexity of the professional environment, as well as the mechanisms for proactive management of work organization parameters. The research focuses on the conceptualization and mathematical modeling of intelligent agents based on deep reinforcement learning (RL) methods within a hybrid decision support system (DSS) designed to maintain the psychophysiological state of the air traffic controller within the functional optimum (eustress). The aim of the article is the development and functional modeling of RL agents for adaptive stress management and the continuous optimization of human-centric support strategies. The tasks of the article include: formalization of the interaction between the operator, the environment, and the agent; implementation of an intermediate state abstraction layer; application of the "action stacking" concept to structure tactical, operational, and strategic interventions; and synthesis of a multi-objective reward function with hybrid expert tuning. Research methods include the Partially Observable Markov Decision Process (POMDP), reinforcement learning (RL), inverse reinforcement learning (IRL), fuzzy logic as a cognitive interface, and explainable artificial intelligence (XAI) methods. The obtained results include: a formalized POMDP model with a three-component observation vector; an integrated fuzzy abstraction layer that transforms raw multimodal data into a belief vector; an ordered matrix of batched interventions; and an extended multi-objective reward function that minimizes the risks of hypostimulation and distress. The scientific novelty lies in the integration of a hierarchical fuzzy inference system with RL algorithms as a deterministic state abstraction layer, as well as in proposing a hybrid reward function architecture that combines classical RL with inverse learning to extract a hidden expert function from the historical decision trajectories of experienced shift supervisors. The practical significance of the system lies in facilitating a technological transition from reactive monitoring to proactive real-time stress management, where transparent recommendations regarding resectorization, micro-breaks, and automation level adjustments are provided to supervisors using XAI tools (Solution Space Diagram).

Keywords: air traffic controller, occupational stress, decision support system, reinforcement learning, explainable artificial intelligence.

Formulation of the problem. The current stage of development of the aviation industry is characterized by an increase in air traffic intensity, the growing complexity of airspace structure, the integration of unmanned systems, and the development of advanced air mobility. The EUROCONTROL Seven-Year Forecast 2025-2031 states that by 2031, approximately 12.2 million flights are expected with an average annual growth rate of about 2.0%, while the long-term forecast 2024–2050 envisions a baseline scenario of 15.4 million flights in 2050 [1, 2]. The quantitative

growth of air traffic is accompanied by a deterioration in operational performance. According to the Performance Review Report (PRR) 2024 (EUROCONTROL), the total volume of en-route ATFM delays in 2024 amounted to 22.4 million minutes (equivalent to 2.8 billion Euro delay costs), which is approximately 24% higher than in 2023 (en-route phase) and is the worst indicator since 2001. Such dynamics indicate not only system overload but also an increase in cognitive and organizational pressure on air traffic control (ATC) personnel [3]. A significant portion of

these delays is associated precisely with staffing and sector capacity constraints in several congested nodes of the European airspace.

The operational environment is further complicated by external technological threats. PRR 2024 recorded that up to 38% of European en-route traffic passed through regions that periodically or regularly experienced GNSS radio frequency interference (GNSS RFI). This implies an increased need for alternative navigation procedures, radar vectoring, and additional actions by the air traffic controller (ATCO), consequently leading to an increase in cognitive workload during real-time sector management. In addition, the safe integration of new types of airborne operations requires the restructuring of airspace, ATC procedures, and support tools for ATCOs. In turn, SESAR considers such changes as a factor driving the growth of operational environment complexity and personnel workload [4].

EASA results showed that in the study sample, 5.6% of all analyzed controller shifts were associated with critical fatigue. At the same time, over the 2013–2022 period in EASA Member States and the United Kingdom, no accidents or serious incidents were directly classified as caused by ATCO fatigue, although 184 occurrences were identified in European event databases where ATCO fatigue was mentioned as a contributing factor; of these, 59 had a potentially hazardous outcome, including loss of separation, airprox, and the issuance of incorrect instructions [5]. The greatest practical value of the EASA report lies in the quantitative assessment of risk factors presented in Fig. 1.

In the USA, similar conclusions were formulated in the FAA expert panel report “Assessing Fatigue

Risk in FAA Air Traffic Operations” (2024), which contains 58 opportunities/recommendations regarding fatigue risk mitigation. Experts explicitly recommend abandoning 2-2-1 type rotational schedules, acknowledging them as physiologically harmful due to circadian disruption. Special emphasis is placed on the necessity to provide sufficient off-duty time, in particular at least 10–12 hours between shifts, especially before night duties [6].

The aviation industry's response to the challenges of fatigue was the development and implementation of Fatigue Risk Management Systems (FRMS). ICAO in Doc 9966 defines a framework for the oversight and implementation of fatigue risk management approaches based on scientific data, operational information, and continuous monitoring. Within the European legal framework, issues of licensing, competence, and general requirements for ANS providers are regulated, in particular, by Commission Regulation (EU) No 2015/340 and Commission Implementing Regulation (EU) No 2017/373 [7-9]. However, EASA research shows that even with the formal existence of FRMS policies, their informational sensitivity is often limited. About 40% of providers collected data on sleep and fatigue only quarterly or annually [5]. Traditional FRMS primarily operate as reactive-planning mechanisms: they are well-suited for schedule verification, event statistics tracking, and regulatory control, but perform significantly worse at detecting short-term surges of cognitive overload that occur directly during tactical operations in the ATC sector. It is this methodological limitation that justifies the transition to systems capable of utilizing multimodal data streams and supporting real-time management decisions.

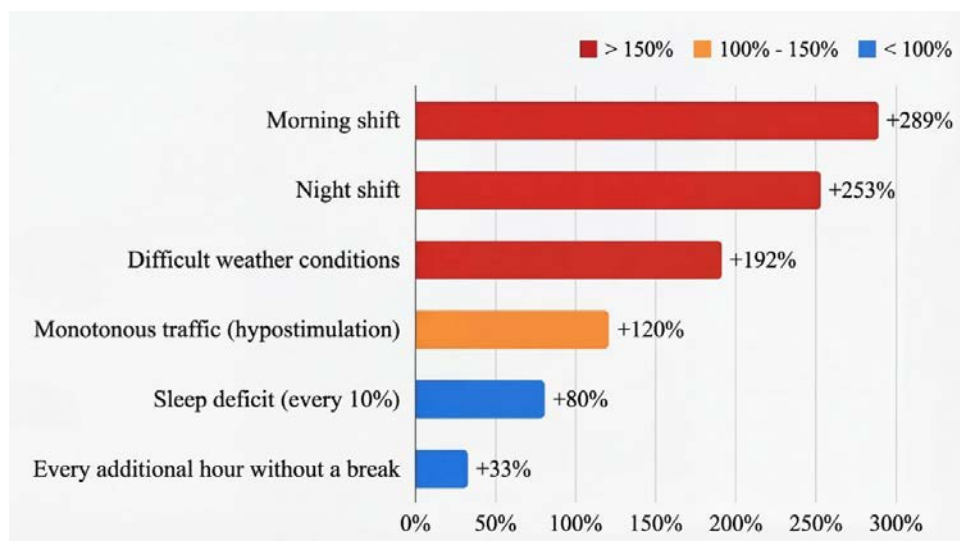


Fig. 1. Factors increasing the risk of critical fatigue in ATCOs

Analysis of recent research and publications.

The air traffic management (ATM) modernization paradigm implemented under the SESAR and Next-Gen programs is aimed at a deeper utilization of automation, data analytics, and artificial intelligence (AI). However, Lisanne Bainbridge, in her classic work "Ironies of Automation," demonstrated that excessive or opaque automation does not eliminate the human factor, but may alter the nature of operator errors, reduce their engagement, and create new risks during moments of system failure or unpredictable behavior [10]. In contemporary ATM research, this thesis has transformed into the requirement to design not just automated, but human-centric decision support systems (DSS). Intelligent decision support complexes in hybrid "human-AI" systems must adapt to the context, workload, and state of the ATCO. Such an approach is part of the strategic directions of the SESAR program and serves as the foundation for research projects like AWARE, in which the AI assistant is considered an adaptive, human-centric component of ATCO support, rather than a complete replacement for the human [11-13]. In this context, it is both scientifically and practically justified to employ an approach where operator state assessment systems (specifically fuzzy models and multi-factor inference systems) are combined with reinforcement learning (RL) algorithms for dynamic, real-time optimization of workload management strategies. Such hybrid DSSs should integrate traffic parameters, weather conditions, sector context, staffing constraints, type of controller shift, automation mode, degree of human involvement in the control loop, circadian factors, and, if possible, current indicators of the ATCO's functional state for proactive workload adaptation. In such a setup, the RL algorithm acts as an adaptive mechanism for finding optimal strategies for rotation, breaks, sector redistribution, and forms of ATCO assistance in a specific operational context. A relevant advanced development is the CODA (Controller adaptive Digital Assistant) project, aimed at creating a digital assistant for ATCOs. The system predicts future traffic and assesses the ATCO's psychophysiological state – mental workload, attention, stress, fatigue, vigilance, and the capacity to handle expected workload. On this basis, CODA adapts the level of automation: it can enhance automated support, activate AI-based tools, or initiate changes in airspace organization, specifically sector splitting. Technologically, the project combines prediction models, neurophysiological assessment, and adaptive automation for dynamic task allocation between the ATCO and the digital assistant based on cognitive

complexity; the optimization of such interaction is carried out within the Human–Machine Performance Envelope approach [14].

In order for intelligent algorithms to effectively optimize stress management strategies, the system requires a clear mathematical and logical model of the control object, i.e., a model of the formation of occupational stress itself. In our previous research on the system dynamics of ATCO stress [15], a comprehensive classification of occupational stress sources was proposed (32 key specific ATCO stressors structured into six conceptual clusters by their source: operational, ergonomic, informational-cognitive, social, psychological, and organizational). Each of these factors is assigned specific indices: an index of controllability and an index of duration of exposure, which allows differentiating measures into operational, tactical, and strategic. Based on this clustering, a multi-criteria system dynamics model of occupational stress has been built. According to this model, the impact of distributed stressors is accumulated and transformed through five macro-components – feedback aggregators: the level of subjective sense of control over the work situation (PC), the level of perceived quality of teamwork (TW), the level of subjective perception of current job demands and complexity (JD), the level of accumulated background stress (BS), and the level of stress self-management efficacy (SM). A specific feature of this model is the identification of non-linear feedback loops that account for a self-reinforcing effect: an objective increase in traffic complexity elevates the overall stress level, which, in turn, physiologically narrows the cognitive capacity of the brain, causing those same work demands to seem even more insurmountable to the ATCO. Similarly, an increase in stress reduces the sense of control over the situation, provoking further panic-driven stress escalation. It is exactly this cyclic nature of occupational stress development that demands intelligent proactive and reactive support for real-time ATCO stress management. For the technological implementation of this system dynamics of ATCO occupational stress, within the framework of our previous studies, the concept of a hybrid decision support system for adaptive real-time assessment of ATCO stress with the capability to generate personalized recommendations for management interventions was proposed [16]. Proactive dynamic management of ATCO occupational stress requires the involvement of the mathematical apparatus of reinforcement learning.

Task statement. The main goal of the article is the development and modeling of the functioning of intelligent agents based on deep reinforcement learn-

ing methods, as part of a hybrid DSS for adaptive management of organizational environment parameters and ensuring the ATCO's psychophysiological state remains within the functional optimum.

Outline of the main material of the study. The implementation of a DSS in the format of a proactive digital manager of ATCO working conditions requires a formal description of the interaction process between the controller, the environment, and the intelligent agent. The most adequate mathematical framework for this is the Partially Observable Markov Decision Process (POMDP). This choice is determined by the fact that the actual psychophysiological and cognitive state of the ATCO cannot be directly measured with absolute accuracy; the system deals only with indirect multimodal features, based on which the operator's hidden state is estimated.

The process is defined by an extended tuple:

$$M_{POMDP} = \langle S, A, P, R, \Omega, O, \gamma \rangle \quad (1)$$

where S is the set of hidden states of the ATCO and the environment; A is the set of admissible control actions; P is the state transition function; R is the reward function; Ω is the set of possible observations; O is the observation function; γ is the discount factor for future rewards.

Since the true state of the ATCO is hidden, the agent does not operate directly with the state $s_t \in S$, but operates with an observation vector $o_t \in \Omega$, formed at each time step Δt . Such a vector is represented as a three-component structure:

$$o_t = (O_{traffic(t)}, O_{physio(t)}, O_{context(t)}) \quad (2)$$

where $O_{traffic(t)}$ is a block of objective air traffic situation parameters, including the number of aircraft in the sector, the geometric complexity index of the airspace configuration, traffic density, and the frequency of potentially conflicting convergences; $O_{physio(t)}$ is a block of physiological indicators, such as heart rate variability, electrodermal activity, respiration rate, and other sensory markers of stress; $O_{context(t)}$ is a contextual block that includes the phase of the controller shift, the duration of continuous work, accumulated sleep deficit, circadian phase, and other relevant conditions.

The state transition function (P) formalizes the dynamics of the system state in the POMDP model, i.e., it specifies how the current hidden state changes after the agent's action:

$$P(s_{t+1} | s_t, a_t) = Pr(s_{t+1} | s_t, a_t) \quad (3)$$

where s_t is the current hidden state of the ATCO and the environment at time t (fatigue level, cognitive

workload, and stress level of the ATCO, traffic complexity); a_t is the action of the agent at time t (changing the level of automation, resectorization, recommended micro-breaks, etc.); s_{t+1} is the next hidden state of the system after the execution of action a_t , i.e., the state at time $t+1$.

The observation function (O) formalizes the mechanism for generating a new feature vector (sensory and contextual data) from the actual hidden system state and the executed action:

$$O(o_{t+1} | s_{t+1}, a_t) = Pr(o_{t+1} | s_{t+1}, a_t) \quad (4)$$

where o_{t+1} is the observation at time $t+1$; a_t is the agent's action performed at the previous step (the action can affect not only the state but also what data will be available for observation).

A key feature of the proposed approach is the use of an already developed hierarchical fuzzy inference system as a deterministic state abstraction layer [16]. Such a layer transforms the high-dimensional observation vector into a belief vector b_t , suitable for further processing by the RL agent:

$$b_t = FIS(o_t) = (PC_t, JD_t, TW_t, BS_t, SM_t, S_{overall}(t)) \quad (5)$$

where $PC_t, JD_t, TW_t, BS_t, SM_t$ are the respective variables represent aggregated fuzzy indicators of the occupational stress assessment components, a $S_{overall}$ is the integral metric indicates the current overall stress level ($S_{overall}(t) \in [1, 7]$).

Thus, fuzzy logic acts as an intermediate cognitive interface between raw physiological and operational data and the reinforcement learning agent.

Taking into account the concept of "action-stacking", an individual agent action is not an elementary command, but an ordered package of interconnected interventions:

$$a_t = (a_t^{(tac)}, a_t^{(opr)}, a_t^{(str)}) \quad (6)$$

where $a_t^{(tac)}$ are **tactical actions** are related to adaptive changes in the level of automation and the automatic connection of auxiliary AI modules (on non-critical tasks) to unload the ATCO, local redistribution of tasks within the shift, introduction of short micro-breaks, and transferring the ATCO to a less stressful workplace; $a_t^{(opr)}$ are **operational actions** are related to opening or closing sectors, changing sector configurations based on projected demand, providing additional team support, redistributing workload among sectors/positions, activating reserve positions, correcting the break plan within the shift, and implementing local air traffic flow and capacity management measures; $a_t^{(str)}$ are **strategic actions** are related to rostering and duty policies, regulating

minimum rest time between shifts, imposing limits on consecutive night shifts and overtime, revising the ratio of time on position to breaks, recalculating the minimum number of personnel per shift, providing cross-rating/training procedures for flexible sector opening, and designing the sector system and prepared configurations.

Thus, the RL agent does not merely react to a state change but forms a structured scenario of organizational impact on the ATCO's working environment.

A critical problem of the model is formulating the reward function. In the stress management task, the target state is not minimizing stress to zero, but maintaining it within the optimal functional tone, i.e., in the **zone of eustress**. According to the provisions of the Yerkes-Dodson law, both excessive stress and insufficient stimulation can degrade performance quality. For instance, hypostimulation (very low traffic levels) reduces ATCOs' vigilance and leads to errors.

We utilize a generalized multi-objective reward function:

$$R_t = \omega_1 R_{eustress}(t) + \omega_2 R_{perf}(t) + \omega_3 R_{cost}(a_t) + \omega_4 R_{safety}(t) \quad (7)$$

where $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ – where the weights are the coefficients of individual target components; $R_{eustress}$ – the eustress component is defined as an inverted quadratic function, peaking at the point of optimal workload: $R_{eustress}(t) = 100 - \lambda \cdot (S_{overall}(t) - S_{optimal})^2$, $S_{optimal} = 3.5$; $R_{perf}(t)$ is the efficiency component acts as a reward for maintaining sector capacity without delays; $R_{cost}(a_t)$ is the action cost represents the operational "cost" of the intervention (e.g., a penalty

for frequent sector configuration changes); $R_{safety}(t)$ is a penalty that grows exponentially if the overall stress exceeds the critical limit of 5.0 (distress zone and loss of situational awareness) (Fig. 2).

The safety component must have a strictly asymmetrical nature, as transitioning into the distress zone is significantly more dangerous than briefly dropping below the optimum. Therefore, the penalty for exceeding the critical threshold is defined by an exponential dependency:

$$R_{safety}(t) = \begin{cases} 0, & \text{if } S_{overall}(t) \leq 5.0; \\ -\eta(e^{\kappa \cdot (S_{overall}(t) - 5.0)} - 1), & \text{if } S_{overall}(t) > 5.0 \end{cases} \quad (8)$$

The action cost component is used to prevent the system from generating an excessive number of reorganizational decisions:

$$R_{cost}(a_t) = -c(a_t) - \rho \cdot 1(a_t \neq a_{t-1}) \quad (9)$$

where $c(a_t)$ is the first part acts as the base operational cost of the selected measure, and the second term implements an action damping mechanism, i.e., penalizes frequent changes in management decisions.

Manual tuning of the weight coefficients ($\omega_1 \dots \omega_4$) in the reward function is an extremely complex task, as human decision-making in civil aviation involves subtle judgments, risk tolerance, and adaptive strategies. To solve this problem, a hybrid application of traditional RL and Inverse Reinforcement Learning (IRL) is proposed. Thus, we obtain a learning architecture based on expert demonstrations with subsequent optimization.

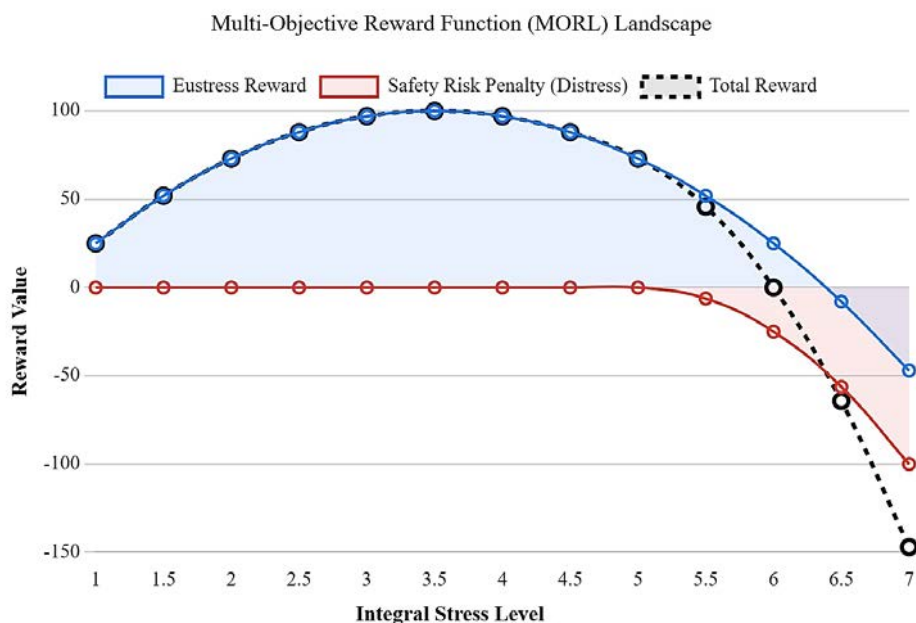


Fig. 2. Dependence of the RL-agent reward function components on the integral stress level of the air traffic controller

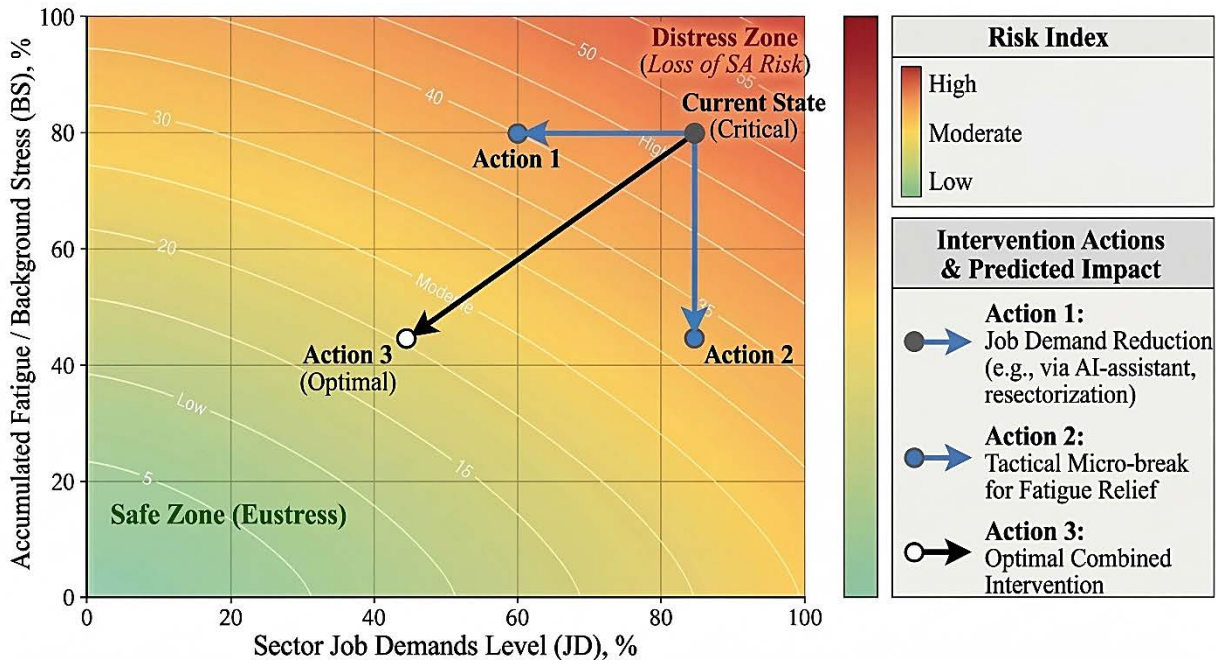


Fig. 3. Solution space visualization (XAI) for the shift supervisor

In the first stage, a hidden expert reward function is extracted from large datasets of historical data:

$$R_{IRL} = f(\tau_{expert}) \quad (10)$$

where τ_{expert} is the corresponding variable denotes the action trajectories of experienced supervisors and ATCOs in critical and pre-critical workload regimes (the system analyzes the actions of the most experienced supervisors during peak loads: exactly when they decided to split a sector, when they sent an ATCO on a break, and when they allowed them to work at the edge of eustress).

In the second stage, this function is combined with explicitly defined safety rules within a hybrid objective function:

$$R_{hybrid}(s_t, a_t) = \alpha \cdot R_{explicit}(s_t, a_t) + \beta \cdot R_{IRL}(s_t, a_t) \quad (11)$$

where $R_{explicit}$ is the strict normative and technological constraints that the system has no right to violate under any circumstances; R_{IRL} is the empathetic component derived from data, which stimulates decision-making in the style of the best human practices; α and β are balancing coefficients.

After constructing the hybrid reward function, a classical safe reinforcement learning algorithm searches for the optimal control policy:

$$\pi^* = \arg \max_{\pi} E_{\pi} \left[\sum_{t=0}^T \gamma^t R_{hybrid}(s_t, a_t) \right] \quad (12)$$

where π^* is the optimal policy; E_{π} is the mathematical expectation over trajectories generated by the policy; T is the planning horizon; γ^t is the discount factor,

which determines the relative value of delayed consequences.

Training of such an agent is carried out in a simulator environment, where rare scenarios of peak workload, chronic fatigue, night shifts, and combined human-machine failures can be reproduced without risk to flight safety.

To ensure transparency of the system's operation and trust from supervisors and ATCOs, Explainable AI (XAI) is integrated into the proposed architecture. Every management action of the agent is accompanied by an interpretable explanation that links the current integral stress index, the most significant stressors, and the expected effect of the recommended intervention. In this context, it is advisable to use a Solution Space Diagram (SSD), which visualizes why, given a specific value of the state, sector workload level, and accumulated fatigue, the system chose automation adaptation, resectorization, a micro-break, or another measure (Fig. 3).

Conclusions. The proposed model enables the implementation of a closed-loop intelligent control system for the ATCO's working conditions. In the considered system, multimodal observations are transformed by a fuzzy system into a compact belief vector; on this basis, the RL agent assesses the current risk of exiting the eustress state, selects a hierarchical control action, predicts its consequences for safety and capacity, and then explains its recommendation to the operator in an interpretable format. Such an architecture lays the groundwork for transitioning

from reactive fatigue monitoring to proactive, adaptive, and human-centric stress management in the ATC environment.

An important stage for further research is the validation of the hybrid decision support system for managing ATCO' occupational stress on representative datasets of real operational shifts. It is necessary to develop methods for adaptive dynamic adjustment of the threshold values of ATCOs' occupational stress. Such models should take into account not only general indicators but also the individual ATCO's experience level, their sensitivity to

specific stressors, and their capacity for occupational stress self-management. This entails creating algorithms that continuously update the stress resilience profiles of each specialist, allowing the system to propose highly personalized interventions. Furthermore, an important task is the application of deep learning methods for the automatic identification of new stressors, their cumulative effects, stress response patterns, and adaptive proactive management interventions that account for the organizational and technological changes occurring in the modern ATM system.

Bibliography:

1. EUROCONTROL. Seven-Year Forecast 2025–2031. Brussels: EUROCONTROL, Spring 2025. 23 p. URL: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2025-02/eurocontrol-seven-year-forecast-2025-2031-february-2025.pdf> (accessed: 16.03.2026).
2. EUROCONTROL. Aviation Long-Term Outlook: Flights and CO₂ emissions forecast 2024-2050. Brussels: EUROCONTROL, 2024. 40 p. URL: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2024-12/eurocontrol-aviation-long-term-outlook-flights-co2-forecast-2024-2050.pdf> (accessed: 16.03.2026).
3. PRR 2024. Performance Review Report. An Assessment of Air Traffic Management in Europe 2024. Brussels: EUROCONTROL, Performance Review Commission, March 2025. 106 p. URL: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2025-03/eurocontrol-performance-review-report-2024.pdf> (accessed: 16.03.2026).
4. Federal Aviation Administration. Advanced Air Mobility (AAM) Implementation Plan. Version 1.0. Washington, DC : FAA, 2023. 40 p.; SESAR Joint Undertaking. European ATM Master Plan. 2025 edition. Brussels : SESAR Joint Undertaking, 2025. 90 p.
5. European Union Aviation Safety Agency. Study on the Analysis, Prevention and Management of Air Traffic Controller Fatigue. Cologne : EASA, May 2024. 138 p. URL: https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/ATCO_Fatigue_Study_Final_report_D4C1_-_V4.1_final_21_May_2024.pdf (accessed: 16.03.2026).
6. Federal Aviation Administration. Assessing Fatigue Risk in FAA Air Traffic Operations. Washington, DC: FAA, 2024. 114 p. URL: https://www.faa.gov/newsroom/media/Fatigue_Report.pdf (accessed: 16.03.2026).
7. ICAO Doc 9966. Manual for the Oversight of Fatigue Management Approaches. Montréal: ICAO, 2016. 202 p.
8. Commission Implementing Regulation (EU) 2017/373 of 1 March 2017 laying down common requirements for providers of air traffic management/air navigation services and other air traffic management network functions and their oversight. Official Journal of the European Union. L62, 8.03.2017. 126 p.
9. Commission Regulation (EU) 2015/340 of 20 February 2015 laying down technical requirements and administrative procedures relating to air traffic controllers' licences and certificates. Official Journal of the European Union. L63, 6.03.2015. 122 p.
10. Bainbridge L. Ironies of automation // Automatica. 1983. Vol. 19, iss. 6. P. 775–779. DOI: 10.1016/0005-1098(83)90046-8.
11. SESAR Joint Undertaking. European ATM Master Plan. 2025 edition. Brussels : SESAR Joint Undertaking, 2025. 90 p.
12. AWARE project (SESAR Joint Undertaking): Achieving human-machine collaboration with artificial situational awareness : website. URL: <https://www.aware-sesar.eu> (accessed: 16.03.2026).
13. Pham D.-T. et al. Human-AI Hybrid Paradigm for Collaborative Air Traffic Management Systems. SESAR Innovation Days, Rome, 12-15 November 2024. 9 p. URL: https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/sid/2024/papers/SIDs_2024_paper_087%20final.pdf (accessed: 16.03.2026).
14. Periodic Reporting for period 1 – CODA (COntroller adaptive Digital Assistant). CORDIS : European Commission. 4 p. DOI: <https://doi.org/10.3030/101114765>.
15. Palonyi A.S., Nechypurenko A.G. Modelling the dynamics of occupational stress in air traffic control. Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2024. Том 35 (74), №5. P. 231-239. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/34>.
16. Palonyi A.S., Nechypurenko A.G. Hybrid decision support system for adaptive assessment and management of air traffic controllers' occupational stress in real-time. Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2025. Том 36 (75), №6. С. 291-299. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.2/40>.

Пальоний А.С., Нечипуренко А.Г. ОПТИМІЗАЦІЯ СТРАТЕГІЙ АВТОМАТИЗОВАНОГО СТРЕС-МЕНЕДЖМЕНТУ АВІАДИСПЕЧЕРІВ МЕТОДАМИ НАВЧАННЯ З ПІДКРІПЛЕННЯМ

Предметом статті є професійний стрес авіадиспетчерів в умовах зростання інтенсивності повітряного руху та ускладнення професійного середовища, а також механізми проактивного управління параметрами організації праці. Дослідження зосереджено на концептуалізації та математичному моделюванні інтелектуальних агентів на основі методів глибокого навчання з підкріпленням (RL) у складі гібридної системи підтримки прийняття рішень (СППР) для утримання психофізіологічного стану авіадиспетчера в межах функціонального оптимуму (еустресу). Метою статті є розробка та моделювання функціонування RL-агентів для адаптивного управління стресом та безперервної оптимізації стратегій людиноцентричної підтримки. Завдання статті включають: формалізацію взаємодії між оператором, середовищем та агентом; реалізацію проміжного шару абстракції стану; застосування концепції «комбінування заходів» для структурування тактичних, оперативних і стратегічних втручань; синтез багатокритеріальної функції винагороди з гібридним експертним налаштуванням. Методи дослідження включають частково спостережуваний марковський процес прийняття рішень (POMDP), навчання з підкріпленням (RL), обернене навчання з підкріпленням (IRL), нечітку логіку як когнітивний інтерфейс та методи зрозумілого штучного інтелекту (XAI). Отримані результати охоплюють: формалізовану модель POMDP із трикомпонентним вектором спостережень; інтегрований нечіткий шар абстракції, що перетворює сирі мультимодальні дані на вектор переконань; впорядковану матрицю пакетних втручань; розгорнуту багатокритеріальну функцію винагороди, що мінімізує ризики гіпостимуляції та дистресу. Наукова новизна полягає в інтеграції ієрархічної нечіткої системи виводу з RL-алгоритмами як детермінованого шару абстракції стану, а також у пропозиції гібридної архітектури функції винагороди, що поєднує класичне RL з оберненим навчанням для вилучення прихованої експертної функції з історичних траєкторій рішень досвідчених супервайзерів диспетчерських змін. Практична значимість системи полягає у забезпеченні технологічного переходу від реактивного моніторингу до проактивного стрес-менеджменту в реальному часі, де за допомогою інструментів XAI (діаграма простору рішень) супервайзерам надаються прозорі рекомендації щодо ресекторизації, мікроперерв та зміни рівня автоматизації.

Ключові слова: авіадиспетчер, професійний стрес, система підтримки прийняття рішень, навчання з підкріпленням, пояснювальний штучний інтелект.

Дата першого надходження статті до видання: 13.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Парфененко Ю.В.

<https://orcid.org/0000-0003-4377-5132>

Сумський державний університет

Кузнєцов Е.Г.

<https://orcid.org/0000-0003-3966-9724>

Сумський державний університет

АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ТА ПРОЄКТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ ОБРОБКИ ВЕЛИКИХ ДАНИХ ДЛЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ ЕНЕРГЕТИЧНИХ МІКРОМЕРЕЖ

У статті розглянуто підходи до зберігання та обробки великих наборів даних цифрових двійників енергетичних мікромереж. Метою роботи є аналітичний огляд підходів до застосування технологій великих даних у цифрових двійниках енергетичних мікромереж, а також розроблення хмарної архітектури обробки даних, яка забезпечує узгоджену інтеграцію процесів збору, оброблення та опрацювання даних. У дослідженні використано методологію аналізу та узагальнення підходів до застосування технологій великих даних у цифрових двійниках енергетичних мікромереж, а також методи архітектурного проєктування хмарної архітектури обробки даних. Проаналізовано та узагальнено сучасні технології й хмарні платформи для роботи з великими даними з позиції їх застосування у цифрових двійниках енергетичних мікромереж. За результатами дослідження обрано платформу AWS, що зумовлено її широкими можливостями масштабування, розвиненим набором сервісів для збирання, зберігання, обробки та аналітики даних.

Наукова новизна роботи полягає у розробленій архітектурі хмарної інфраструктури зберігання та обробки великих даних для цифрових двійників енергетичних мікромереж на платформі AWS.

Запропонована хмарна архітектура полягає в інтеграції потокового надходження даних від сенсорів цифрових двійників через AWS IoT Core із подальшою передачею та буферизацією за допомогою Apache Kafka і Amazon Kinesis Data Streams, їх збереженням у Amazon S3, Amazon Timestream та Amazon DynamoDB і подальшою обробкою. Обчислення та аналітика реалізуються з використанням Amazon EC2, Amazon EMR, AWS Lambda і AWS Glue, а моделювання – у Amazon SageMaker, з подальшою візуалізацією через Amazon QuickSight та моніторингом у Amazon CloudWatch.

Розроблена хмарна архітектура дозволяє дотримуватися ключових принципів роботи з великими даними, зокрема масштабованості, розподіленого зберігання та обчислень, а також забезпечення цілісності, безпеки й доступності даних.

Ключові слова: великі дані, аналіз, обробка даних, цифровий двійник, хмарні технології, хмарна платформа, розгортання, AWS.

Постановка проблеми. Застосування цифрових двійників як віртуальної копії фізичної системи, що інтегрує дані реального часу, симуляції та методи машинного навчання для створення динамічної, інтерактивної моделі реального середовища, на сьогодні набуває все більшого поширення. Для енергетичних мікромереж цифровий двійник дозволяє створити віртуальну модель енергосистеми, що відтворює її стан у реальному часі на основі даних сенсорів, забезпечуючи можливість

моніторингу, аналізу режимів роботи, прогнозування навантажень і генерації, а також підтримки прийняття рішень щодо оптимізації функціонування та підвищення надійності мікромережі. Цифрові двійники є особливо ефективними в оптимізації потоків енергії в мікромережах, моделюючи різні операційні сценарії, прогнозуючи потенційні збої та пропонуючи стратегії для підтримки стабільності системи за умов коливань навантажень та генерації з відновлюваних джерел енергії.

Водночас застосування цифрових двійників у контексті енергетичних мікромереж пов'язане з рядом специфічних викликів, зумовлених масштабом і складністю сучасних енергетичних систем. У таких системах функціонує велика кількість вимірювальних пристроїв, таких як, датчики, лічильники, а також контролерів, які підключені до мереж передачі даних через гетерогенні комунікаційні середовища Інтернету речей. Постійна взаємодія цих компонентів призводить до формування значних потоків різноманітних даних, що характеризують стан обладнання, параметри електричних мереж та режими їх функціонування. Ці дані використовуються при побудові методів штучного інтелекту для прогнозування енергоспоживання та генерації електроенергії, виявлення аномалій у роботі обладнання, оцінювання технічного стану енергетичних активів, а також оптимізації режимів роботи енергетичних мікромереж. Окрім цього, необхідно збирати дані безпосередньо про стан цифрового двійника, його параметри, конфігурацію моделей, результати симуляцій та обчислень, а також показники синхронізації з фізичною системою, що забезпечує актуальність і коректність відображення стану енергетичної мікромережі.

Таким чином, у результаті оперативного моніторингу в режимі реального часу генеруються значні обсяги даних, які необхідно накопичувати та зберігати для подальшого використання під час застосування моделей машинного навчання, зокрема для аналізу режимів роботи мікромережі, прогнозування навантажень і генерації електроенергії тощо.

Разом з тим значні обсяги даних, що надходять з різних джерел, характеризуються високою швидкістю генерації, різноманітністю форматів та нерідко містять неповні або зашумлені значення. Такі особливості ускладнюють їх безпосереднє використання в системах цифрових двійників та вимагають застосування ефективних методів попередньої обробки, інтеграції та аналізу даних. Для забезпечення коректного функціонування цифрових двійників необхідно реалізувати архітектури обробки великих даних, здатні забезпечувати збирання, зберігання, обробку та аналітику значних потоків інформації в режимі, близькому до реального часу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Цифрові двійники є інструментом ефективного та безпечного керування великими масивами історичних даних та потоками даних у режимі реального часу, підтримуючи роботу мікромережі, та

забезпечуючи підтримку прийняття рішень при проектуванні, експлуатації та обслуговуванні енергетичних мікромереж [1].

У роботах Цюара Т. (Cioara T.) та ін., Лай Й. (Lai Y.) та ін. [2,3] зазначається, що джерелами даних для цифрових двійників енергетичних систем є різноманітні сенсори та пристрої моніторингу, включно з інтелектуальними лічильниками, датчиками напруги та струму, фазорними вимірювальними блоками (PMU), датчиками стану обладнання, а також пристроями Інтернету речей (IoT), з яких збирають дані в режимі реального часу. Технологія цифрових двійників використовує великі дані для моделювання та підтримки прийняття рішень щодо роботи й управління енергомережею в нормальних умовах функціонування та для виявлення відхилень від стаціонарного стану [4].

Підхід до управління енергетичною мікромережею, заснованих на обробці великих даних, представлено у роботі Лю Л. (Liu L.) та ін. [5]. Він забезпечує інтелектуальне управління розподіленою генерацією та локальним споживанням, а також оптимізує взаємодію всіх наявних джерел розподіленої енергії, систем зберігання та навантажень у межах мікромережі. Інтелектуальне управління складною мікромережею, що реалізується через центр управління на основі великих даних, дозволяє раціонально розподіляти енергію та підвищувати безпеку і надійність системи, сприяючи її інтелектуальному розвитку.

Вибір платформи обробки великих даних залежить від конкретних вимог до обробки та характеристик даних у застосунках цифрових двійників мікромереж. Apache Spark розглядається як найбільш відповідна технологія для застосунків інтелектуальних мереж, оскільки вона підтримує як пакетну, так і потокову обробку, що робить її застосування можливим обробки даних систем цифрових двійників [6]. Однак Spark вимагає зовнішніх систем зберігання даних, тому він найкраще працює, коли його встановлено поверх Hadoop, щоб використовувати розподілену файлову систему Hadoop (HDFS) для паралельного розподіленого зберігання [7]. Такий розподілений підхід гарантує, що потоки даних у режимі реального часу, необхідні для точного представлення цифрових двійників, можуть підтримуватися та оброблятися ефективно, підтримуючи двонаправлений обмін даними між фізичними мікромережами та їхніми віртуальними аналогами. Для цифрового двійника, що потребує потокової обробки даних у реальному часі, переважною є Apache Storm, тоді як Hadoop залишається опти-

мальним для пакетної офлайн-обробки великих наборів даних [7].

Платформи хмарних обчислень забезпечують масштабовану інфраструктуру, що може бути основою для розгортання цифрових двійників мікромереж. Хмарні платформи підтримують як структуровані, так і неструктуровані дані через розподілені архітектури, побудовані на Hadoop, Spark та інших проектах великих даних [8]. О варіанти хмарних сховищ для аналізу великих даних, включаючи Amazon S3, Google BigQuery, Microsoft Azure та Google Drive, з практичними впровадженнями за допомогою таких інструментів, як Google Colab та PySpark, для прогнозування стабільності мережі [9]. Amazon Web Services (AWS) пропонує комплексні рішення, включаючи AWS IoT Greengrass, що використовується для периферійних обчислень та дозволяє локальну обробку й аналіз даних, знижуючи витрати на масштабне розгортання обчислювальної інфраструктури для енергетичних мікромереж [10]. Платформа Azure Digital Twins дозволяє цифрові моделі складних фізичних середовищ, зокрема, енергетичних мереж або інфраструктури, що інтегрують дані з IoT-пристроїв і роблять можливими аналітику, моніторинг і оптимізацію роботи систем у реальному часі [11]. Хоча використання хмарних технологій для обробки великих даних цифрових двійників стає все більш поширеним, питання вибору хмарної платформи та архітектури для зберігання та обробки великих даних цифрових двійників енергетичних мікромереж досліджене недостатньо. Існує потреба у розробленні хмарної архітектури, що забезпечуватиме ефективне зберігання, обробку й аналіз великих даних цифрових двійни-

ків для підтримки прийняття рішень в управлінні енергомережею.

Постановка завдання. Метою дослідження є аналіз підходів до використання технологій великих даних у цифрових двійниках енергетичних мікромереж та проектування хмарної архітектури обробки великих даних, що забезпечує інтеграцію процесів збирання даних, їх обробку та подальшу аналітику.

Виклад основного матеріалу. Інтеграція технологій великих даних стає важливою, оскільки енергетичні мікромережі генерують величезні обсяги даних часових рядів з різних джерел, включаючи системи відновлюваної енергії, пристрої зберігання даних, навантаження та умови навколишнього середовища. Схема потоків даних при управлінні енергетичними мікромережами від збирання до зберігання великих обсягів даних показана на рис. 1.

Традиційні методи обробки даних не можуть впоратися з таким масштабом та складністю, що робить розподілені обчислювальні платформи, такі як Apache Spark та Hadoop, необхідними для аналітики в реальному часі та програм машинного навчання. Платформи хмарних обчислень, такі як AWS, забезпечують масштабовану інфраструктуру, необхідну для зберігання та аналітики наборів великих даних.

Перевагою використання хмарних технологій у системах обробки великих даних є еластичність ресурсів, можливість горизонтального масштабування обчислювальних потужностей, висока відмовостійкість та зменшення витрат на створення і підтримку власної інфраструктури. Крім того, хмарні сервіси інтегрують інструменти потокової

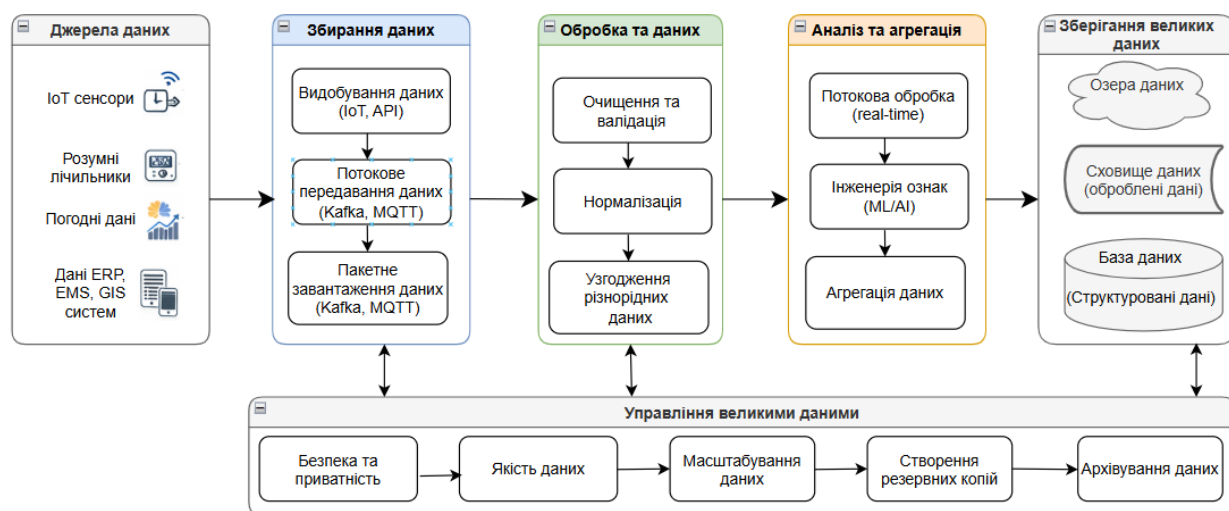


Рис. 1. Схема потоків даних при управлінні енергетичними мікромережами

обробки, аналітики великих даних та машинного навчання, що дозволяє швидко розгортати аналітичні платформи для підтримки функціонування цифрових двійників енергетичних систем [12].

Було проаналізовано та узагальнено технології та хмарні платформи для роботи з великими даними за напрямом використання у цифрових двійниках енергетичних мікромереж [13, 14] (табл. 1).

Проведений аналіз застосування технологій великих даних у цифрових двійниках енергетичних мікромереж (табл. 1) показує, що для реалізації задач збору, обробки та аналітики даних використовуються різні хмарні платформи, серед яких найбільш поширеними є AWS, Microsoft Azure та Google Cloud Platform. У даному дослідженні для проєктування архітектури обробки даних цифрового двійника енергетичної мікромережі обрано платформу AWS, оскільки вона надає широкий набір спеціалізованих сервісів для роботи з великими даними, потоковими даними та IoT (зокрема AWS IoT, Amazon S3, Amazon Kinesis, AWS Lambda), забезпечує високу масштабованість, надійність і гнучкість розгортання аналітичних компонентів у хмарному середовищі.

Для ефективного проєктування архітектури обробки великих даних у цифрових двійниках енергетичних мікромереж доцільно розглядати три функціональні рівні: інтеграція даних, масштабована обробка та аналітика. На рівні інтеграції даних забезпечується збір і структуриза-

ція інформації з різномірних джерел, включно з IoT-пристроями, SCADA-системами, сенсорами енергетичних активів та даними про навантаження [13, 14]. Таким чином буде забезпечено дотримання принципу BDIS–BDPS–BDAS (Big Data Integration System – Big Data Processing System – Big Data Analytics System), що передбачає три рівні управління та обробки даних.

У запропонованій архітектурі реалізується масштабована обробка даних цифрових двійників енергетичних мікромереж із використанням сервісів хмарної платформи AWS (рис. 2).

Джерела даних формуються сенсорами та IoT-пристроями, розташованими у розподілених мікромережах, які безперервно передають інформацію про енергоспоживання, напругу, струм та інші фізичні параметри системи.

Потокові дані надходять до AWS IoT Core, що забезпечує безпечний і надійний прийом повідомлень від сенсорів та їх маршрутизацію до обчислювальних і аналітичних сервісів. Для організації високопродуктивної передачі поточкових даних використовується Apache Kafka, яка виконує роль брокера повідомлень, забезпечує буферизацію та гарантовану доставку даних, а також дозволяє масштабувати обробку великих потоків інформації від численних сенсорних вузлів. Додатково, Amazon Kinesis Data Streams інтегрує потокові дані та передає їх до сховищ і аналітичних сервісів для подальшої обробки.

Таблиця 1

Напрямок використання	Приклад великих даних	Технології великих даних	Платформи	Інструменти
Моніторинг та збір даних	IoT-сенсори, SCADA, смарт-лічильники	Потокова обробка даних у реальному часі	Azure IoT Hub, AWS IoT Core, Google Cloud IoT	Apache Kafka, Spark Streaming, Apache Flink
Прогнозування споживання	Історичні профілі навантаження, погодні дані	Машинне навчання та глибоке навчання	Azure Machine Learning, AWS SageMaker, Google Vertex AI	TensorFlow, PyTorch, Scikit-learn
Інтеграція відновлюваних джерел енергії	Дані про сонячну радіацію, вітер, метеопрогнози	Аналітика великих даних та сховища даних (Data Lake)	Google Cloud Platform, AWS Data Analytics, Cloudera Data Platform	BigQuery, Apache Hadoop, Spark SQL
Оптимізація роботи	Тарифи, графіки навантаження, стан обладнання	Хмарні обчислення та оптимізаційна аналітика	AWS Lambda, Azure Functions, Google Cloud Functions	Gurobi, SciPy Optimize, Pyomo
Надійність та безпека	Журнали систем, кіберінциденти, аномалії	Виявлення аномалій та пояснюваний штучний інтелект (XAI)	Microsoft Sentinel, IBM Watson OpenScale, Google Chronicle	Splunk, Elastic Stack (ELK), Apache Metron
Підтримка рішень	Дані енергоринку, регуляторні вимоги	Бізнес-аналітика та візуалізація даних	Power BI, Tableau, Qlik Sense	Grafana, Apache Superset
Технічне обслуговування	Вібрації, температури, історія ремонтів	Предиктивне технічне обслуговування та цифрові двійники	Azure Digital Twins, AWS IoT TwinMaker, Siemens MindSphere	IBM Maximo, ThingWorx Analytics

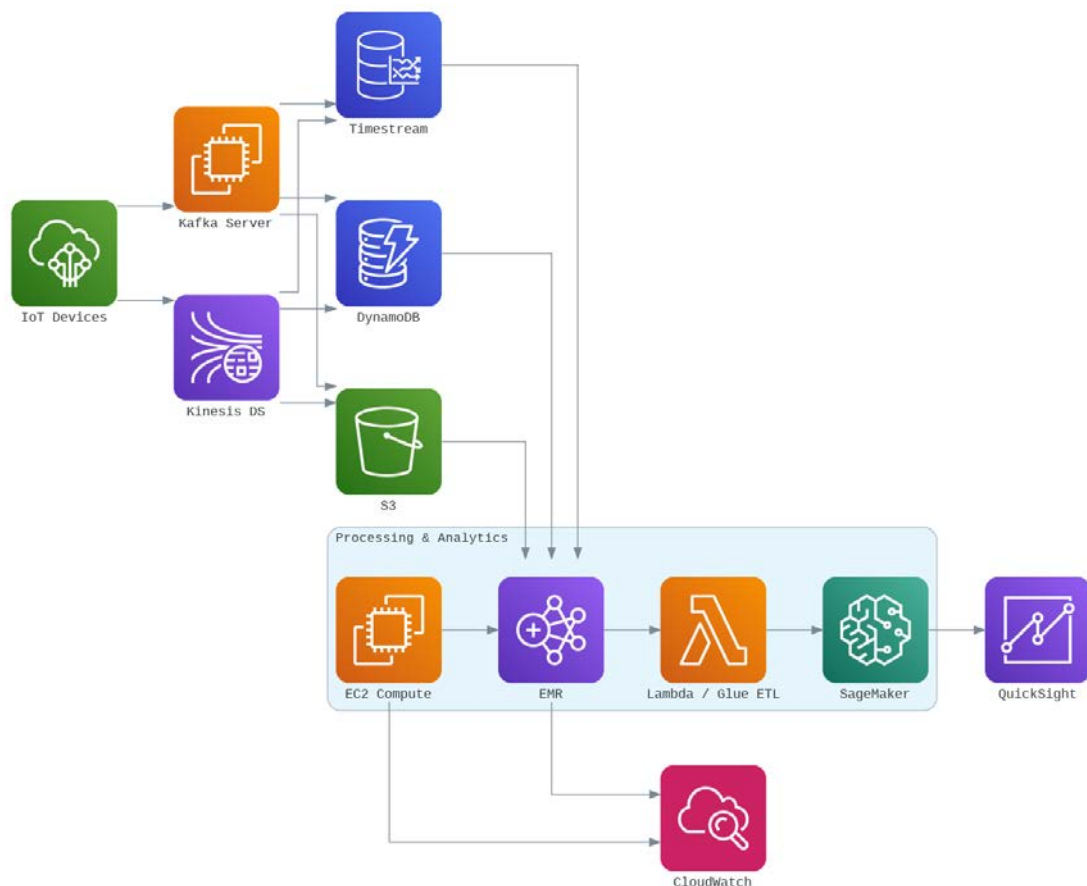


Рис. 2. Хмарна архітектура зберігання та обробки великих даних на платформі AWS

Збереження даних здійснюється через Amazon S3 для необроблених та історичних даних, а також Amazon Timestream та DynamoDB для структурованих даних часових рядів цифрових двійників. Така організація сховищ забезпечує одночасно ефективний доступ до історичних даних та високошвидкісну обробку поточних показників системи.

Для обчислень та аналітики у хмарі використовується EC2 як центральний обчислювальний вузол, що координує роботу блоку “Processing & Analytics” і взаємодіє з потоковими брокерами та сховищами даних. Amazon EMR із фреймворками Apache Spark та Hadoop застосовується для масових аналітичних обчислень та підготовки даних, забезпечуючи високу продуктивність при роботі з великими обсягами інформації. Додатково, AWS Lambda та AWS Glue реалізують ETL-процеси для перетворення та очищення даних, підготовки їх до моделювання цифрових двійників. Навчання моделей та прогнозування поведінки мікромереж виконується у Amazon SageMaker, що дозволяє створювати аналітичні моделі з використанням машинного навчання та автоматизувати процес оцінки їх продуктивності.

Візуалізація аналітики та ключових показників цифрових двійників здійснюється через Amazon

QuickSight, що надає інтерактивні панелі моніторингу та інструменти для детального аналізу даних. Amazon CloudWatch забезпечує безперервний моніторинг стану всієї системи, збір логів і оповіщення про потенційні відхилення або помилки.

Безпека та контроль доступу забезпечуються через IAM Roles, шифрування даних за допомогою AWS KMS, а також розгортання компонентів у ізольованих середовищах VPC, що гарантує захищену обробку та зберігання великих обсягів даних цифрових двійників.

Висновки. У результаті проведеного дослідження узагальнено підходи до зберігання та обробки великих даних у цифрових двійниках енергетичних мікромереж. Обґрунтовано доцільність використання платформи AWS для побудови інфраструктури обробки великих даних завдяки її гнучкості, широкому набору сервісів та можливостям горизонтального масштабування. Розроблена хмарна архітектура зберігання та обробки великих даних, що забезпечує узгоджену взаємодію компонентів збору, передавання, зберігання, обробки та аналізу даних, і таким чином дозволяє реалізувати повний цикл роботи з даними цифрового двійника.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання запропо-

нованої архітектури як основи для створення та впровадження цифрових двійників енергетичних мікромереж. Перспективи подальших досліджень пов'язані з оптимізацією витрат на обробку даних, підвищенням ефективності моделей машинного навчання та розширенням функціональних мож-

ливостей систем підтримки прийняття рішень на основі цифрових двійників.

Дослідження виконувалося в рамках держбюджетної НДР «Методи та технології штучного інтелекту для стійкого управління енергетичними системами із застосуванням цифрових двійників» (№ 0126U000866).

Список літератури:

1. Bazmohammadi N., Madary A., Vasquez J. C., Bazmohammadi H., Khan B., Wu Y. Et al. Microgrid digital twins: concepts, applications, and future trends. *IEEE Access*. 2021. Vol. 10. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3138990.
2. Cioara T. et al. An overview of digital twins application domains in smart energy grid. *arXiv*. 2021. arXiv:2104.07904. DOI: 10.48550/arXiv.2104.07904.
3. Lai Y. et al. Construction of a digital twin model for incremental aggregation of multi-type load information in hybrid microgrids under integrity constraints. *Energy Informatics*. 2024. Vol. 7. Article 112. DOI: 10.1186/s42162-024-00404-5.
4. He X. et al. Preliminary exploration on digital twin for power systems: challenges, framework, and applications. *arXiv*. 2019. arXiv:1909.06977. DOI: 10.48550/arXiv.1909.06977.
5. Liu L. et al. Intelligent control of micro grid: a big data-based control center. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018. Vol. 108, № 5. P. 052037. DOI: 10.1088/1755-1315/108/5/052037.
6. Dihan M. S. et al. Digital twin: data exploration, architecture, implementation and future. *Heliyon*. 2024. Vol. 10, № 5. P. e26503. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e26503.
7. Zainab A., Ghayeb A., Syed D. et al. Big data management in smart grids: technologies and challenges. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 73046–73059.
8. Guo K. et al. Fault diagnosis of intelligent production line based on digital twin and improved random forest. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, № 16. P. 7733. DOI: 10.3390/app1167733.
9. Xu J. et al. Research on integrated intelligent energy management system based on big data analysis and machine learning. *arXiv*. 2025. arXiv:2508.05583. DOI: 10.48550/arXiv.2508.05583.
10. Borra P., Mullapudi M., Nerella H., Prakashchand L. Analyzing AWS edge computing solutions to enhance IoT deployments. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*. 2024. Vol. 13, № 6. P. 8–12. DOI: 10.35940/ijeat.F4519.13060824.
11. Калайда А. В., Пан М. П. Створення цифрових двійників розумних будівель на платформі Azure Digital Twins. *Комуніальне господарство міст*. 2024. № 6 (187). С. 2–7. DOI: 10.33042/2522-1809-2024-6-187-2-7.
12. Aslam S. et al. Machine learning applications in energy systems: current trends, challenges, and research directions. *Energy Informatics*. 2025. Vol. 8. Article 62. DOI: 10.1186/s42162-025-00524-6.
13. Hashem I. A. T. et al. The rise of “big data” on cloud computing: review and open research issues. *Information Systems*. 2015. Vol. 47. P. 98–115. DOI: 10.1016/j.is.2014.07.006.
14. Chen M., Mao S., Liu Y. Big data: a survey. *Mobile Networks and Applications*. 2014. Vol. 19, № 2. P. 171–209. DOI: 10.1007/s11036-013-0489-0.

Parfenenko Yu.V., Kuznetsov E.G. ANALYSIS OF APPROACHES AND DESIGN OF BIG DATA PROCESSING ARCHITECTURE FOR DIGITAL TWINS OF ENERGY MICROGRIDS

The article considers approaches to storage and processing big data sets of digital twins of energy microgrids. The purpose of the work is to provide an analytical overview of approaches to the application of big data technologies in digital twins of energy microgrids, as well as the development of a cloud data processing architecture that provides a consistent integration of data collection, processing and processing processes. The study uses a methodology for analyzing and summarizing approaches to the application of big data technologies in digital twins of energy microgrids, as well as methods for architectural design of a cloud data processing architecture. Modern technologies and cloud platforms for big data processing in digital twins of energy microgrids are analyzed and summarized. According to the results of the study, the AWS platform was chosen, which is due to its wide scalability capabilities and a developed set of services for data collection, storage, processing and analytics.

The scientific novelty of the work lies in the developed architecture of the cloud infrastructure for storing and processing big data for digital twins of energy microgrids on the AWS platform.

The proposed cloud architecture consists of integrating streaming data from digital twin sensors via AWS IoT Core with subsequent transmission and buffering using Apache Kafka and Amazon Kinesis Data Streams, their storage in Amazon S3, Amazon Timestream and Amazon DynamoDB and further processing. Computing and analytics are implemented using Amazon EC2, Amazon EMR, AWS Lambda and AWS Glue, and modeling is implemented in Amazon SageMaker; with subsequent visualization via Amazon QuickSight and monitoring in Amazon CloudWatch.

The proposed cloud architecture allows to adhere to the key principles of working with big data, in particular scalability, distributed storage and computing, as well as ensuring data integrity, security and availability.

Keywords: big data, analysis, data processing, digital twin, cloud technologies, cloud platform, deployment, AWS.

Дата першого надходження статті до видання: 18.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 14.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Пилипенко А.Г.

<https://orcid.org/0009-0008-2861-7906>

Харківський національний університет радіоелектроніки

МУЛЬТИАГЕНТНІ МЕТОДИ ВИЯВЛЕННЯ КОРЕЛЯЦІЙНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ У РІЗНОРІДНИХ ДАНИХ

У роботі досліджено мультиагентні методи виявлення кореляційних залежностей у різномірних даних на основі архітектури MSMAA (Modal-Segregated Multi-Agent Architecture). Запропоновано розглядати процес формування рішень як структуровано організований конвеєр інтеграції семантичних, символічних і топологічно обумовлених інформаційних сигналів, у якому ключову роль відіграє графово-керований механізм допустимості контексту пов'язаних об'єктів. На відміну від підходів, орієнтованих на максимізацію прогнозової точності, дослідження зосереджене на аналізі архітектурно зумовлених поведінкових ефектів системи.

Емпіричну перевірку виконано на вибірці з 1639 спостережень типу «тикер–день» для 39 акцій за період 2023 року. Для кожного спостереження система формує категоріальний напрям (Up/Down/Neutral) та рівень впевненості. Порівняння здійснюється між двома режимами функціонування однієї архітектури: AGG (без використання контексту пов'язаних компаній) та GRAPH (із графово-керуваним допуском такого контексту). Встановлено, що перехід до режиму GRAPH супроводжується зміною напрямку рішення у 29,7% випадків та рівня впевненості у 27,8% випадків, що свідчить про наявність систематичного поведінкового ефекту.

Показано, що основний вплив пов'язаний із зменшенням невизначеності через трансформацію нейтральних станів у напрямлені рішення, тоді як прямі інверсії напрямів спостерігаються значно рідше. Частка явного відображення контексту пов'язаних компаній у текстових поясненнях становить 67,8%, що вказує на часткову спостережуваність механізму інтеграції інформаційних сигналів. Додатково зафіксовано покращення агрегованих результатних показників для режиму GRAPH, що підтверджує змістовність виявлених ефектів.

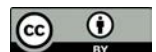
Отримані результати свідчать, що мультиагентні методи, засновані на структурованому допуску та інтеграції різномірних даних, забезпечують більш узгоджене формування рішень і відкривають перспективи для подальшого розвитку методів виявлення кореляційних залежностей у складних інформаційних середовищах.

Ключові слова: мультиагентні методи, різномірні дані, кореляційні залежності, граф знань, інформаційні системи, прийняття рішень, машинне навчання.

Постановка проблеми. У сучасних інформаційних системах, орієнтованих на формування рішень в умовах аналізу складних динамічних процесів, спостерігається зростаюча потреба в архітектурно організованій обробці різномірних джерел даних [1, с. 24] [2, с. 1219]. До таких джерел належать текстові потоки новин, числові часові ряди та структуровані відомості про взаємозв'язки між об'єктами, що можуть бути представлені у вигляді графів знань. Відмінність природи цих даних, різна семантика та часові характеристики ускладнюють їх узгоджену обробку в межах єдиного підходу до формування рішень.

Традиційні підходи до виявлення кореляційних залежностей у різномірних даних переважно орієнтовані або на однорідні джерела, або на

їх попередню уніфікацію у спільному просторі ознак [3, с. 408] [4, с. 7]. При цьому текстові, числові та структурні сигнали часто інтегруються у межах єдиного простору ознак, що призводить до втрати модально-специфічної інформації та зниження інтерпретованості результатів. У таких підходах різномірні сигнали інтегруються у змішаному просторі ознак без явного урахування ролі кожного типу даних у формуванні кінцевого рішення. Останні досягнення у галузі великих мовних моделей відкрили можливості інтеграції текстових і числових сигналів у межах єдиних генеративних систем [3, с. 408] [4, с. 7]. Однак у більшості випадків така інтеграція реалізується у вигляді відносно монолітного мультимодального контексту, де різномірні сигнали подаються



до моделі без чітко визначеної структурної організації [1, с. 24] [5, с. 1]. Це ускладнює контроль процесу формування рішення, підвищує ризик некоректної інтерпретації числових даних та не забезпечує явного механізму врахування міжоб'єктних залежностей.

Окремою проблемою є використання інформації про взаємозв'язки між об'єктами, зокрема між компаніями у корпоративному середовищі. Хоча графові моделі широко застосовуються для представлення таких залежностей, їх інтеграція з текстовими та числовими сигналами часто здійснюється або на рівні векторних подань, або через евристичне розширення контексту [6, с. 8912] [7, с. 8315]. У результаті відсутній формалізований механізм визначення того, які саме інформаційні сигнали пов'язаних об'єктів є структурно допустимими для використання у конкретному завданні формування рішення [6, с. 8912–8913] [7, с. 8315–8316].

Таким чином, існує протиріччя між потребою у комплексній обробці різномірних даних при формуванні рішень та відсутністю методів, що забезпечують їх структуровано організовану інтеграцію з урахуванням модальної специфіки та міжоб'єктних залежностей. Це обумовлює необхідність розробки мультиагентних методів, у яких різні типи інформаційних сигналів обробляються у функціонально спеціалізованих компонентах, а їх інтеграція здійснюється за формалізованими правилами. У цьому контексті актуальним є створення методів, що дозволяють:

- розділяти обробку різних модальностей даних із збереженням їх семантичної автономності [1, с. 24] [2, с. 1219];
- формалізувати процес інтерпретації числових сигналів через протокольно-обумовлені процедури [8, с. 1] [9, с. 10036];
- використовувати графові структури не лише як джерело ознак, а як механізм керування допустимістю контексту [6, с. 8912] [7, с. 8315];
- забезпечувати контрольований процес синтезу рішення з урахуванням можливих конфліктів між сигналами [10, с. 1].

Розв'язання зазначеної проблеми пропонується здійснити шляхом розробки мультиагентного методу, що реалізує модально-розділену архітектуру обробки інформаційних сигналів та графово-керований механізм допуску контексту пов'язаних об'єктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У суміжній літературі останніх років спостерігається активний розвиток підходів до побудови

систем підтримки прийняття рішень на основі великих мовних моделей, зокрема у задачах фінансового аналізу та короткострокового прогнозування [3, с. 408] [11, с. 2509]. Такі системи, як правило, поєднують новинний контекст, ринкові сигнали або їх комбінації з метою формування категоріальних рішень і супровідних текстових пояснень [3, с. 408] [11, с. 2509]. Водночас значна частина цих досліджень зосереджується насамперед на оцінюванні результативності через агреговані метрики – точність класифікації, прибутковість або результати ретроспективного тестування, – тоді як внутрішня організація процесу формування рішення зазвичай не виступає самостійним об'єктом аналізу [4, с. 7].

Для задач короткого горизонту така орієнтація створює суттєве методологічне обмеження. У випадках, коли система одночасно оперує текстовими, числовими та міжсуб'єктними сигналами, важливим стає не лише кінцевий результат, а й спосіб, у який різні джерела інформації допускаються, інтерпретуються та інтегруються у процесі формування рішення. Саме питання архітектурної організації цього процесу в значній частині суміжних робіт залишається недостатньо формалізованим [1, с. 24] [2, с. 1219].

Окремий напрям досліджень становлять мультиагентні та рольово-організовані системи, у яких різні компоненти відповідають за аналіз окремих аспектів предметної області – новинного контексту, фундаментальних факторів або технічних сигналів [1, с. 24] [2, с. 1219]. Такі підходи демонструють потенціал функціонального розподілу ролей між агентами та модульної організації обробки інформації. Проте у більшості випадків рольова декомпозиція використовується переважно як принцип координації або розподілу функцій, а не як формалізований механізм побудови рішення. Виходи окремих агентів часто агрегуються за допомогою евристичних правил або спрощених схем узгодження, що не враховують різний статус модальностей у формуванні фінального рішення і не забезпечують контрольованої інтеграції різномірних сигналів у межах єдиного керованого конвеєра [1, с. 24] [5, с. 1].

Значну увагу в сучасних дослідженнях також приділено поєднанню великих мовних моделей із графами знань та механізмами контекстного видобутку. У таких системах граф, як правило, використовується для розширення інформаційного контексту, видобутку релевантних фактів або включення сигналів пов'язаних об'єктів до подальшого аналізу [6, с. 8912] [7, с. 8316]. Осно-

вна мета при цьому полягає у покращенні контекстного покриття та підвищенні повноти інформації, доступної моделі. Разом з тим така постановка зазвичай орієнтована на розширення контексту, а не на його структурне обмеження. У результаті відсутній формалізований механізм визначення того, які саме сигнали пов'язаних об'єктів є допустимими для використання у конкретному процесі формування рішення [6, с. 8912–8913] [7, с. 8316]. Це особливо важливо у задачах короткострокового аналізу, де надлишковий або слабо пов'язаний контекст може спотворювати інтерпретацію сигналів і змінювати характер фінального рішення.

Паралельно розвиваються підходи, у яких генеративні моделі поєднуються з формалізованими правилами, обмеженнями та структурованими процедурами інтерпретації. У межах таких робіт підкреслюється важливість зменшення довільності reasoning-процесу, особливо під час роботи з числовими або логічно структурованими сигналами [8, с. 1] [9, с. 10036]. Використання зовнішніх протоколів, правил узгодженості та проміжних представлень дозволяє зробити обробку більш відтворюваною та зменшити ризик некоректної інтерпретації. Однак у більшості таких підходів подібні механізми залишаються локальними інструментами контролю або уточнення генерації, а не розглядаються як повноцінні структурні компоненти мультиагентної архітектури формування рішення [8, с. 1] [9, с. 10036].

Ще один важливий напрям досліджень пов'язаний із аналізом конфліктів між інформаційними сигналами та забезпеченням можливості аудиту рішень. У таких роботах конфлікт між джерелами інформації розглядається як невід'ємна характеристика складних аналітичних задач, що потребує спеціалізованих механізмів обробки. Одночасно зростає інтерес до забезпечення прозорості процесу формування висновку, зокрема через аналіз текстових пояснень або трасування використаного контексту. Проте більшість існуючих систем або не забезпечують явного зв'язку між допущеним контекстом і текстовими поясненнями, або не мають формалізованого механізму контролю того, які саме сигнали були включені до процесу прийняття рішення. Це обмежує можливості відтворюваного аналізу та зовнішньої перевірки результатів [10, с. 1].

Таким чином, аналіз сучасних досліджень дозволяє виділити кілька ключових обмежень: відсутність чітко визначеної архітектурної організації процесу формування рішення у системах, що

працюють із різнорідними сигналами; недостатню формалізацію ролі окремих модальностей у побудові фінального виходу; використання графових структур переважно як інструментів розширення контексту, а не механізмів контролю його допустимості; обмежене використання символічно-протокольних процедур як повноцінних структурних компонентів архітектури; відсутність системного підходу до обробки конфліктів сигналів і аудиту рішень.

У цьому контексті запропоноване дослідження розташовується на перетині кількох суміжних напрямів – систем підтримки прийняття рішень на основі великих мовних моделей, мультиагентних архітектур, графово-інтегрованих підходів та формалізованих механізмів інтерпретації. Водночас його внесок не зводиться до жодного з них окремо. Запропонований підхід розглядає процес формування рішення як архітектурно організовану процедуру, у якій різні модальності обробляються у функціонально спеціалізованих агентах, контекст пов'язаних об'єктів визначається через графово-керований механізм допустимості, а інтеграція сигналів здійснюється за допомогою конфліктно-чутливого протоколу. Саме така постановка дозволяє перейти від відносно неструктурованого мультимодального аналізу до керованої системи формування рішень.

Постановка завдання. Метою роботи є розроблення та дослідження мультиагентної архітектури формування рішень MSMAA (Modal-Segregated Multi-Agent Architecture), а також аналіз того, як архітектурна організація обробки, структурного допуску та інтеграції різнорідного інформаційного evidence впливає на поведінку категоріальних рішень системи [1, с. 24] [5, с. 1]. Об'єктом дослідження є процес архітектурно організованої обробки, відбору, допуску, інтерпретації та інтеграції інформаційних сигналів у мультиагентній архітектурі MSMAA, який охоплює семантичну інтерпретацію подієвого контексту, символічно-протокольну обробку числових даних, топологічно обумовлений допуск контексту пов'язаних об'єктів та конфліктно-чутливий синтез рішення [8, с. 1] [6, с. 8912]. У центрі уваги перебуває організація цього процесу як керованого конвеєра, у межах якого реалізуються різні мультиагентні методи роботи з різнорідними даними, що забезпечують інтерпретацію кореляційних залежностей у процесі формування рішення [1, с. 24] [5, с. 1]. Предметом дослідження є мультиагентні методи та механізми структурованої обробки, допуску, інтерпретації та інтеграції інформацій-

них сигналів у межах архітектури MSMAA, через які виявляються кореляційні залежності між різними типами даних [9, с. 10036] [7, с. 8315].

Виклад основного матеріалу. У цій роботі архітектура MSMAA розглядається як модально-розділена мультиагентна архітектура формування рішень, у якій різні типи інформаційних сигналів обробляються у функціонально спеціалізованих агентах, а фінальний категоріальний вихід формується через структурований протокол інтеграції [1, с. 24] [5, с. 1]. На відміну від підходів, у яких різномірні сигнали інтегруються у межах відносно монолітного reasoning-процесу без експліцитно зафіксованої архітектурної ролі модальностей, у MSMAA реалізовано поетапну організацію процесу формування рішення [1, с. 24] [2, с. 1219]. У її межах семантичний, символічний і топологічний компоненти мають різні функції та різний статус у формуванні фінального рішення [1, с. 24] [5, с. 1].

Архітектурно MSMAA складається з чотирьох основних функціональних агентів (рис. 1):

- агент семантичної інтерпретації подієво-новинного контексту;
- агент протокольно-обумовленої технічної обробки сигналів;
- агент відбору контексту пов'язаних компаній на основі механізму активації залежностей;

– агент фінального конфлікт-чутливого синтезу рішення.

Запропонований метод формування рішення реалізується як послідовність функціонально впорядкованих етапів, кожен з яких реалізується окремим агентом та виконує визначене перетворення інформаційних сигналів. Наведемо формалізований опис цього мультиагентного методу.

Нехай, V – множина корпоративних сутностей (компаній), $G=(V, E, \tau E)$ – онтологічний граф знань, де $E \subseteq V \times V$ – множина відношень, $\tau E: E \rightarrow T$ – типізація відношень; $D_{text}(u, t)$ – множина текстових документів (новин), пов'язаних із сутністю $u \in V$ у момент часу t ; $X(u, t)$ – вектор технічних (числових) ознак, обчислених для сутності u у момент часу t ; Δt – допустиме часове вікно валідності сигналів. Ціль роботи методу – для заданої сутності $v \in V$ у момент часу t сформувати рішення:

$$Y(v, t+1) \in \{Up, Down, Neutral\}.$$

Метод MSMAA задається як композиція чотирьох відображень:

$$Y(v, t+1) = F_{final} \circ F_{graph} \circ (F_{tech} \circ F_{sem}),$$

де кожне відображення відповідає окремому агенту.

Етап 1. Формування семантичних подієвих сигналів. Здійснюється оброблення неструктура-

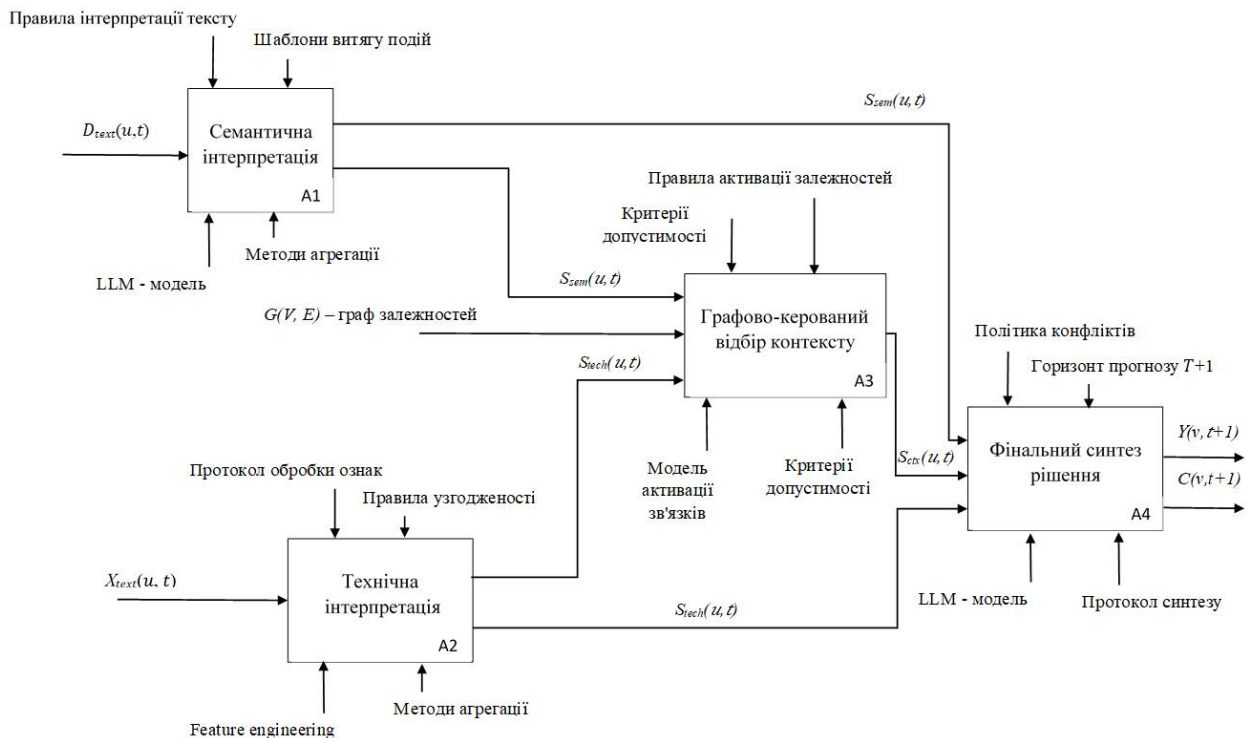


Рис. 1. Модально-розділена мультиагентна архітектура системи формування рішень

ного новинного та подієвого контексту, пов'язаного з цільовою сутністю. На данному етапі виконується інтерпретація текстових даних, виділяються події фактори, формується агрегований семантичний сигнал для цільового об'єкта у заданий момент часу. Визначимо відображення семантичного агента як $F_{sem} : D_{text}(u, t) \rightarrow S_{sem}(u, t)$, де $S_{sem}(u, t)$ – агрегований семантичний сигнал. Тоді, формально

$$Ssem(u, t) = Agg_{sem}$$

де f_{LLM} – функція інтерпретації окремого документа; Agg_{sem} – оператор агрегації. На виході етапу отримаємо семантичний сигнал цільового рівня.

Етап 2. Протокольно-обумовлена інтерпретація технічних сигналів. Виконується оброблення числових (технічних) даних у межах заздалегідь визначеного символічного протоколу [8, с. 1] [9, с. 10036]. Етап включає: структурування ознак за функціональними групами, усунення дублюючих сигналів, перевірку узгодженості між групами, застосування правил консервативної інтерпретації. Визначимо $F_{tech} : X(u, t) \rightarrow S_{tech}(u, t)$, де $S_{tech}(u, t)$ – структурований технічний сигнал. Формально, $S_{tech}(u, t) = \Pi(X(u, t))$, де Π – детермінований протокол інтерпретації, що включає групування ознак, селекцію репрезентативних індикаторів, правила узгодженості, функцію гейтингу. На виході етапу формується структурований технічний висновок.

Етап 3. Відбір структурно допустимого контексту пов'язаних компаній. Реалізується відбір інформаційних сигналів пов'язаних компаній на основі: онтологічного графа знань та моделі умовної активації залежностей [6, с. 8912] [7, с. 8315]. Етап передбачає: ідентифікацію потенційно пов'язаних компаній, перевірку умов активації залежностей, відбір лише тих сигналів, що є структурно допустимими. Визначимо множину потенційно пов'язаних компаній:

$$N_k(v) = \{u \in V \mid \exists \text{ шлях } P(u \rightarrow v), |P| \leq k\}.$$

Функція активації залежностей $Dactive(u, v, t) \in \{0, 1\}$ формує множину допустимого контексту:

$$C(v, t) = \{u \in N_k(v) \mid D_{active}(u, v, t) = 1\},$$

та задає відображення графового агента: $F_{graph} : (S_{sem}, S_{tech}, G) \rightarrow S_{ctx}(v, t)$, де $S_{ctx}(v, t) = \{S_{sem}(u, tu), S_{tech}(u, tu) \mid u \in C(v, t)\}$. Таким чином, на виході третього етапу створюється контекст пов'язаних компаній, допущений до інтеграції.

Етап 4. Конфлікт-чутливий синтез рішення. На завершальному етапі здійснюється інтегра-

ція: семантичного сигналу, технічного висновку та структурно допустимого контексту пов'язаних об'єктів. Синтез виконується за правилами: пріоритетності сигналів цільового рівня, умовного врахування зовнішнього контексту, врахування конфліктів між сигналами, консервативного вибору нейтрального рішення у випадку невизначеності [8, с. 1] [9, с. 10036]. Фінальний агент визначається як

$$F_{final} : (S_{sem}(v, t), S_{tech}(v, t), S_{ctx}(v, t)) \rightarrow Y(v, t + 1),$$

і формально реалізує функцію синтезу, яка враховує пріоритет сигналів цільового рівня, умовний вплив контексту, конфлікти сигналів та обмежуючі правила.

Емпіричне дослідження виконано у контрольованому середовищі для аналізу поведінкових ефектів мультиагентної архітектури MSMAA [12, с. 18851, 18858]. Експеримент проведено на вибірці з 1639 спостережень типу «тикер–день» (39 акцій, період – пів року). Для кожного спостереження система формує категоріальний напрям (Up/Down/Neutral) та рівень впевненості (Low/Medium/High). Усі рішення приймаються лише на основі інформації, доступної до моменту часу t , що забезпечує коректну постановку для горизонту $T+1$ [13, с. 70]. Порівнюються два режими функціонування однієї архітектури: AGG (без використання контексту пов'язаних компаній) та GRAPH (із графово-керованим допуском такого контексту). Обидва режими працюють на однаковому базовому інформаційному наборі, що створює підстави інтерпретувати зафіксовані відмінності як пов'язані насамперед з архітектурною організацією режимів AGG і GRAPH [12, с. 18858] [13, с. 70].

Результати свідчать, що перехід від режиму AGG до режиму GRAPH супроводжується помітними змінами у поведінці системи. У цьому контексті режим AGG відповідає базовому варіанту функціонування архітектури, в якому рішення формується виключно на основі інформаційних сигналів цільової компанії (семантичних і технічних), тоді як режим GRAPH додатково використовує інформаційні сигнали пов'язаних компаній, допущені через графово-керований механізм структурної допустимості [6, с. 8912–8913] [7, с. 8315–8316]. Кількісно встановлено, що приблизно у 29,7% спостережень змінюється категоріальний напрям рішення, а у 27,8% випадків – рівень впевненості. Це свідчить про те, що включення структурно обумовленого контексту пов'язаних компаній асоціюється зі змінами як

у виборі напрямку, так і у ступені визначеності рішення. Отримано 95% довірчі інтервали для обох показників (27,4–32,6% для напрямку та 25,3–29,5% для впевненості) отримано із використанням moving block bootstrap-підходу, який застосовується для апроксимації розподілу статистик за наявності часової залежності між спостереженнями [14, с. 3497–3499]. У цілому це дає підстави інтерпретувати відмінності між AGG і GRAPH як відтворюваний поведінковий ефект, асоційований з архітектурним механізмом інтеграції додаткового контексту, а не як випадкові флуктуації в межах цього експериментального налаштування.

Як додатковий контекст для інтерпретації поведінкових відмінностей у таблиці 1 наведено агреговані показники для базового варіанта та досліджуваних режимів архітектури.

У межах даного експериментального налаштування режим GRAPH демонструє вищі агреговані показники порівняно з AGG. Водночас ці результати розглядаються лише як допоміжний контекст для інтерпретації зафіксованих поведінкових відмінностей і не використовуються як підстава для тверджень про загальну перевагу архітектури.

Отримані результати узгоджуються з припущенням, що графово-керований механізм допуску контексту пов'язаних компаній асоціюється зі змінами у поведінці мультиагентної архітектури. Його дія проявляється у зміні категоріальних рішень, модифікації рівнів впевненості та зменшенні невизначеності через уточнення нейтральних станів. Таким чином, архітектурна організація процесу інтеграції різнорідних даних у межах MSMAA може розглядатися як чинник, пов'язаний зі спостережуваними відмінностями у формуванні категоріальних рішень і рівнів упевненості між режимами AGG і GRAPH [12, с. 18851, 18858].

Висновки. У роботі досліджено мультиагентну архітектурну організацію формування рішень у різнорідних даних, реалізовану в межах архітектури MSMAA, де методи виявлення кореляційних

залежностей інтегровані у структурований процес обробки, допуску та інтеграції інформаційних сигналів. Ключовим елементом є графово-керований механізм допустимості контексту пов'язаних компаній, який визначає структурно релевантну область додаткових інформаційних сигналів і забезпечує їх контрольовану інтеграцію [6, с. 8912–8913] [7, с. 8315–8316].

Емпіричний аналіз на вибірці з 1639 спостережень показав, що перехід від режиму AGG до режиму GRAPH супроводжується відтворюваними поведінковими змінами: у 29,7% випадків змінюється категоріальний напрям рішення (95% CI: 27,4–32,6%), а у 27,8% – рівень впевненості (95% CI: 25,3–29,5%). Встановлено, що основний ефект проявляється у зменшенні невизначеності через перехід від стану Neutral до прямих рішень. Частка явного відображення контексту пов'язаних компаній у текстових поясненнях становить 67,8%, що вказує на часткову спостережуваність механізму його впливу [10, с. 1]. Додатково, у межах обмеженого експериментального сценарію, зафіксовано покращення агрегованих результатів для режиму GRAPH (зокрема, дохідність 13,42% та коефіцієнт Шарпа 1,95 у режимі close→close), однак ці результати розглядаються лише як допоміжний контекст для інтерпретації виявлених поведінкових ефектів, а не як універсальний доказ переваги архітектури [12, с. 18851, 18858].

Таким чином, показано, що мультиагентні методи, побудовані на принципах структурованого допуску та інтеграції різнорідних даних, асоціюються зі спостережуваними змінами у структурі формування рішень і дозволяють інтерпретувати кореляційні залежності між інформаційними сигналами у межах архітектурно організованого процесу. Подальші дослідження доцільно спрямувати на: перевірку стабільності отриманих результатів у багаторазових прогонах; розширення моделей графових залежностей; поглиблений аудит відповідності текстових пояснень фактично використаному контексту; застосування запропонованої архітектурної рамки до інших предметних областей різнорідних даних.

Таблиця 1

Порівняння результатів у режимі (close→close)				
Strategy	Final return	Sharpe	Max drawdown	Hit rate
TA	-4.35%	-1.00	-7.24%	-3.43%
AGG	3.58%	0.58	-5.50%	50.30%
GRAPH	13.42%	1.95	-3.43%	56.21%

Список літератури:

1. Niu B., Song Y., Lian K., Shen Y., Yao Y., Zhang K., Liu T. Flow: A Modular Approach to Automated Agentic Workflow Generation. *ArXiv*. 2025 <https://www.doi.org/10.48550/arXiv.2501.07834>.
2. Liu J., Yu C., Gao J., Xie Y., Liao Q., Wu Y., Wang Y. LLM-Powered Hierarchical Language Agent for Real-time Human-AI Coordination. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2024)*, Vol 1., p. 1219–1228. 2024. <https://doi.org/10.65109/ZDXP6361>.
3. Li X., Chan S., Zhu X., Pei Y., Ma Z., Liu X., Shah S. Are ChatGPT and GPT-4 General-Purpose Solvers for Financial Text Analytics? A Study on Several Typical Tasks. In *Proceedings of the 2023 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing: Industry Track*, p. 408–422. 2023. <https://www.doi.org/10.18653/v1/2023.emnlp-industry.39>
4. Jadhav A., Mirza V. Large Language Models in equity markets: applications, techniques, and insights. *Frontiers in Artificial Intelligence*, Vol. 8, p.1608365. 2025. <https://www.doi.org/10.3389/frai.2025.1608365>.
5. Tao W., Zhou Y., Wang Y., Zhang W., Zhang H., Cheng Y. MAGIS: LLM-Based Multi-Agent Framework for GitHub Issue Resolution. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2024)*, Vol 37. 2024. <https://www.doi.org/10.52202/079017-1647>.
6. Zhu X., Xie Y., Liu Y., Li Y., Hu W. Knowledge Graph-Guided Retrieval Augmented Generation. In *Proceedings of the 2025 Conference of the Nations of the Americas Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies*, Vol. 1: Long Papers, p. 8912–8924. 2025. <https://www.doi.org/10.18653/v1/2025.naacl-long.449>.
7. Sui Y., He Y., Liu N., He X., Wang K., Hooi B. FiDeLiS: Faithful Reasoning in Large Language Models for Knowledge Graph Question Answering. *Findings of the Association for Computational Linguistics: ACL 2025*, p. 8315–8330. 2025. <https://www.doi.org/10.18653/v1/2025.findings-acl.436>.
8. Zhang H., Kung P.-N., Yoshida M., Van den Broeck G., Peng N. Adaptable Logical Control for Large Language Models. *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2024)*, Vol 37. 2024. <https://www.doi.org/10.52202/079017-3670>.
9. Bonlarron A., Régis F., De Maria E., Régis J.-C. Large Language Model Meets Constraint Propagation. In *Proceedings of the Thirty-Fourth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-25)*, p. 10036–10044. 2025. <https://www.doi.org/10.24963/ijcai.2025/1115>.
10. Turpin M., Michael J., Perez E., Bowman S. R. Language Models Don't Always Say What They Think: Unfaithful Explanations in Chain-of-Thought Prompting. *Advances in Neural Information Processing Systems*, Vol. 36. 2023. <https://doi.org/10.52202/075280-3275>.
11. Li H., Cao Y., Yu Y., Javaji S. R., Deng Z., He Y., Jiang Y., Zhu Z., Subbalakshmi K. P., Huang J., Qian L., Peng X., Suchow J. W., Xie Q. INVESTORBENCH: A Benchmark for Financial Decision-Making Tasks with LLM-based Agent. In *Proceedings of the 63rd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, Vol. 1: Long Papers, p. 2509–2525. 2025. <https://www.doi.org/10.18653/v1/2025.acl-long.126>.
12. Tjuatja L., Neubig G. BehaviorBox: Automated Discovery of Fine-Grained Performance Differences Between Language Models. In *Proceedings of the 63rd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, Vol. 1: Long Papers, p. 18851–18873. 2025. <https://www.doi.org/10.18653/v1/2025.acl-long.923>.
13. Bergmeir C., Hyndman R. J., Koo B. A note on the validity of cross-validation for evaluating autoregressive time series prediction. *Computational Statistics & Data Analysis*, Vol. 120, p. 70–83. 2018. <https://www.doi.org/10.1016/j.csda.2017.11.003>.
14. Pilavakis D., Paparoditis E., Sapatinas T. Moving block and tapered block bootstrap for functional time series with an application to the K-sample mean problem. *Bernoulli*, Vol. 25(4B) p. 3496-3526. 2019. <https://www.doi.org/10.3150/18-BEJ1099>

Pylypenko A.H. MULTI-AGENT METHODS FOR DETECTING CORRELATION DEPENDENCIES IN HETEROGENEOUS DATA

This paper investigates multi-agent methods for detecting correlation dependencies in heterogeneous data based on the MSMAA (Modal-Segregated Multi-Agent Architecture). The decision-making process is modeled as a structurally organized pipeline for integrating semantic, symbolic, and topologically conditioned information signals, where a graph-governed admissibility mechanism for related entities plays a key role. Unlike approaches focused on maximizing predictive performance, this study emphasizes the analysis of architecture-induced behavioral effects of the system.

The empirical evaluation is conducted on a dataset of 1,639 “ticker-day” observations covering 39 stocks over the 2023 period. For each observation, the system produces a categorical direction (Up/Down/Neutral), a confidence level, and a protocolized textual explanation. The comparison is performed between two operational modes of the same architecture: AGG (without using related-company context) and GRAPH (with graph-governed inclusion of such context). The results show that switching to the GRAPH mode leads to a change in decision direction in 29.7% of cases and a change in confidence level in 27.8% of cases, indicating a systematic behavioral effect.

It is shown that the primary effect is associated with uncertainty reduction through transitions from neutral states to directional decisions, while direct inversions are relatively rare. The share of explicit references to related-company context in textual explanations is 67.8%, indicating partial observability of the integration mechanism. Additionally, improved aggregated performance metrics are observed for the GRAPH mode, supporting the substantive nature of the detected effects.

The findings demonstrate that multi-agent methods based on structured admissibility and integration of heterogeneous data enable more consistent decision formation and provide a foundation for further development of correlation detection methods in complex information environments.

Keywords: multi-agent methods, heterogeneous data, correlation dependencies, knowledge graph, information systems, decision support, machine learning.

Дата першого надходження статті до видання: 15.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Пирог М.В.<https://orcid.org/0000-0003-2588-6066>

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Терещук Г.М.<https://orcid.org/0000-0001-7573-9748>

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

ВАЛІДНІСТЬ ТЕСТОВОГО ОЦІНЮВАННЯ ЗНАНЬ СТУДЕНТІВ В ЕПОХУ ГЕНЕРАТИВНОГО ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ: СИСТЕМАТИЧНИЙ ОГЛЯД

Стаття присвячена актуальній проблемі впливу генеративного штучного інтелекту на валідність тестового оцінювання знань студентів у закладах вищої освіти. Поява та швидке поширення моделей типу GPT створили серйозний виклик традиційним методам контролю знань, оскільки сучасні генеративні моделі демонструють високу ефективність у проходженні академічних тестів, особливо завдань репродуктивного характеру.

На основі систематичного огляду наукових публікацій проаналізовано ключові аспекти використання генеративних моделей ШІ в різних типах тестів, а також сучасні підходи до трансформації систем оцінювання.

Дослідження виявило, що студенти широко застосовують генеративний ШІ під час підготовки та проходження тестів, особливо асинхронних онлайн-тестів. Водночас автоматичні детектори тексту та системи онлайн-прокторингу мають суттєві обмеження щодо точності та надійності, що робить їх недостатньо ефективними для забезпечення академічної доброчесності.

У статті обґрунтовано необхідність радикального переосмислення підходів до тестового оцінювання. Запропоновано принципи AI-резистентного дизайну завдань, які базуються на підвищенні когнітивної складності, персоналізації та контекстуалізації завдань. Систематизовано альтернативні методи оцінювання.

На основі проведеного аналізу сформульовано практичні рекомендації для закладів вищої освіти України щодо короткострокової, середньострокової та довгострокової трансформації систем тестового оцінювання в умовах широкої доступності генеративного штучного інтелекту. Особлива увага приділена необхідності переходу від політики заборони до стратегії етичної та педагогічно обґрунтованої інтеграції ШІ в освітній процес.

Ключові слова: генеративний штучний інтелект, тестове оцінювання, академічна доброчесність, валідність оцінювання, детекція ШІ, AI-резистентне оцінювання, вища освіта, онлайн-тестування, автентичне оцінювання.

Постановка проблеми. Тестування залишається одним із найпоширеніших методів оцінювання знань студентів у системі вищої освіти завдяки своїй ефективності, відносній об'єктивності та можливості оперативної перевірки результатів великої кількості здобувачів освіти [1]. Проте поява генеративних моделей штучного інтелекту, що стали широко доступними для студентів і продемонстрували здатність успішно виконувати різні типи тестових завдань, поставило під сумнів валідність традиційних форм контролю знань [2].

Сучасні дослідження свідчать, що генеративні моделі ШІ демонструють високі результати у тестах, особливо у форматах де переважають завдання репродуктивного характеру [3, 4]. Водночас поширення ШІ у вищій освіті супроводжується активним використанням цих інструментів студентами для підготовки до тестування [5, 6]. Особливо вразливими виявляються асинхронні онлайн-тести, у межах яких студенти мають доступ до зовнішніх ресурсів і мінімальний рівень безпосереднього контролю.

За цих умов для закладів вищої освіти постає фундаментальна проблема: як забезпечити валід-

ність і надійність тестового оцінювання? Дослідження показують, що традиційні методи виявлення академічної нечесності мають суттєві обмеження: автоматичні детектори ШІ-генерованого контенту демонструють нестабільну точність, а редагування або перефразування суттєво знижує ефективність таких інструментів [7, 8]. Водночас заборона використання ШІ видається малореалістичною, оскільки ці технології поступово стають частиною сучасного професійного.

Для України ця проблема набуває особливої актуальності в умовах цифровізації освіти та поширення дистанційних і змішаних форматів навчання. У зв'язку з цим заклади вищої освіти потребують науково обґрунтованих підходів до адаптації систем тестового оцінювання, які б забезпечували академічну доброчесність, збереження освітніх стандартів і справедливості оцінювання.

Таким чином, виникає потреба у комплексному аналізі впливу генеративного штучного інтелекту на валідність тестування як методу оцінювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. *Методологія огляду.* Для систематичного аналізу проблеми впливу генеративного штучного інтелекту на тестове оцінювання студентів було проведено пошук наукових публікацій у базах даних Scopus та Web of Science. Часовий діапазон пошуку охоплював період з 2020 по 2025 рік, з особливим фокусом на публікації після листопада 2022 року – моменту публічного запуску ChatGPT. Ключовими термінами пошуку були: «ChatGPT», «generative AI», «student assessment», «testing», «multiple choice questions», «academic integrity», «AI detection», «online proctoring». Було проаналізовано 24 наукові публікації, що включають емпіричні дослідження, систематичні огляди, мета-аналізи та методичні рекомендації провідних освітніх організацій.

Тематичний аналіз досліджень. Фундаментальні дослідження впливу генеративного штучного інтелекту на освіту підкреслюють необхідність переосмислення традиційних підходів до оцінювання та забезпечення академічної доброчесності [2]. Систематичні огляди останніх років демонструють стрімке зростання інтересу до цієї проблематики та неоднозначність впливу генеративного ШІ на результати навчання [9, 10, 11].

Окремий напрям досліджень присвячений продуктивності генеративних моделей у тестових завданнях. Результати свідчать, що сучасні моделі здатні успішно виконувати завдання різних типів [3, 4]. Водночас виявляються обмеження,

пов'язані з інтерпретацією контекстуально залежних і культурно специфічних завдань [12].

Значна увага приділяється проблемі академічної доброчесності. Дослідження свідчать про широке використання інструментів ШІ у навчальному процесі, що поєднується з етичними дилемами та ризиками недоброчесної поведінки [1, 6, 13]. Водночас технологічні підходи до детекції ШІ-генерованого контенту мають обмежену ефективність [7, 8].

У зв'язку з цим сучасні дослідження фокусуються на трансформації дизайну оцінювання. Запропоновані підходи включають інтеграцію ШІ як навчального інструменту, розробку завдань вищих когнітивних рівнів, а також впровадження автентичного та процесуального оцінювання [14, 15, 16, 17]. Важливу роль відіграють також інституційні політики, спрямовані на формування етичного та відповідального використання ШІ в освіті [18].

Сучасний науковий дискурс засвідчує перехід від спроб технологічного контролю до комплексного переосмислення підходів до оцінювання.

Постановка завдання. Мета дослідження полягає у систематизації та критичному аналізі наукових досліджень щодо впливу генеративного штучного інтелекту на валідність та надійність тестування як методу оцінювання знань студентів, а також визначенні ефективних стратегій адаптації тестових систем до нових технологічних реалій.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Проаналізувати здатність сучасних генеративних моделей ШІ до успішного проходження різних типів академічних тестів та визначити фактори, що впливають на їхню продуктивність.
2. Систематизувати дані про використання ШІ студентами під час тестування, визначити найбільш вразливі форми тестового оцінювання.
3. Оцінити ефективність існуючих методів детекції використання ШІ в тестових відповідях.
4. Узагальнити сучасні підходи до створення AI-резистентних тестів та альтернативних методів оцінювання.
5. Сформулювати науково обґрунтовані рекомендації для закладів вищої освіти України щодо трансформації систем тестового оцінювання з урахуванням викликів епохи генеративного штучного інтелекту.

Об'єкт дослідження: процес оцінювання знань студентів закладів вищої освіти методом тестування в умовах широкої доступності генеративного штучного інтелекту.

Предмет дослідження: валідність і надійність тестового оцінювання знань студентів, а також підходи до його адаптації в умовах поширення генеративного штучного інтелекту.

Систематичний огляд наукової літератури дозволить виявити найбільш ефективні стратегії збереження академічної доброчесності при тестовому оцінюванні, окреслити перспективні напрямки трансформації систем оцінювання у вищій освіті.

Виклад основного матеріалу.

Продуктивність генеративного штучного інтелекту в проходженні тестів. Одним із ключових чинників, що впливає на валідність тестового оцінювання в епоху генеративного штучного інтелекту, є здатність сучасних моделей успішно виконувати академічні тестові завдання. Дослідження демонструють суттєву еволюцію продуктивності моделей: якщо GPT-3.5 показував обмежені результати, то GPT-4 та новіші версії досягають рівня, співставного або навіть вищого за середні показники студентів [3, 4].

Результативність генеративного ШІ значною мірою залежить від характеристик завдань. Найбільш вразливими є завдання репродуктивного характеру тоді як відкриті завдання з розгорнутими відповідями демонструють вищу стійкість до автоматизованого виконання [3, 4]. Відповідно до таксономії Блума, завдання нижчих когнітивних рівнів є більш доступними для ШІ, тоді як завдання, що передбачають аналіз, синтез, оцінювання або створення, залишаються складнішими для моделей.

Важливим фактором є також предметна специфіка та контекст завдання. Дослідження показують, що генеративні моделі демонструють вищу ефективність у технічних і формалізованих дисциплінах, тоді як у гуманітарних галузях їхня продуктивність є нижчою [12, 19]. Крім того, більшість досліджень базується на англомовних тестах, тоді як для інших мов, зокрема української, точність моделей може бути нижчою.

Попри високі результати, генеративні моделі демонструють низку обмежень. Вони можуть допускати помилки у завданнях, що вимагають глибокого контекстуального розуміння, знань «здорового глузду» або роботи з неявною інформацією, а також схильні до генерації правдоподібних, але некоректних відповідей («галюцинацій») [3]. Нижча ефективність також спостерігається у випадках використання візуальних елементів та завдань, що потребують актуальної інформації [12].

Таким чином, сучасні генеративні моделі вже становлять суттєвий виклик для традиційного

тестування, однак їхня ефективність залишається нерівномірною та залежною від структури, складності та контексту завдань.

Отримані результати свідчать, що зростання продуктивності генеративного ШІ безпосередньо впливає на поведінку студентів та практики його використання під час тестування.

Використання штучного інтелекту студентами під час тестування. Генеративний ШІ швидко інтегрувався у навчальну практику студентів і використовується для пошуку інформації, пояснення складних тем, підготовки до тестування та перевірки відповідей [5, 6]. Водночас таке використання супроводжується ризиками академічної недоброчесності та етичними дилемами [1, 18]. Аналіз досліджень дає змогу виокремити кілька моделей використання ШІ студентами: пряму генерацію відповідей, часткове використання як допоміжного інструменту для пояснення матеріалу чи структурування відповідей, а також верифікацію й перефразування відповідей з метою уникнення детекції [6, 13].

Використання ШІ студентами не слід розглядати виключно як прояв академічної недоброчесності, оскільки воно відображає ширші трансформації освітнього середовища, пов'язані з цифровізацією [6, 18]. Це зумовлює необхідність переходу від суто контрольних механізмів до переосмислення підходів до оцінювання та аналізу ефективності методів детекції.

Методи детекції використання штучного інтелекту. Зростання використання генеративного штучного інтелекту студентами стимулювало розвиток різних підходів до виявлення ШІ-генерованого контенту. Автоматичні детектори тексту демонструють нестабільну точність і залежать від характеристик тексту [7, 8].

Для тестів із множинним вибором застосовуються статистичні методи аналізу відповідей, що дозволяють виявляти аномальні патерни, зокрема невідповідність між складністю завдань і правильністю відповідей або нетипові часові характеристики виконання [1]. Однак такі підходи не забезпечують однозначного підтвердження використання ШІ, а лише ідентифікують потенційно підозрілі випадки.

Онлайн-прокторинг розглядається як додатковий інструмент контролю в умовах дистанційного оцінювання, проте його ефективність є обмеженою, а впровадження супроводжується проблемами приватності, психологічного комфорту та нерівності доступу до технологій [20, 21, 22]. Навіть у поєднанні з іншими підходами прокто-

ринг не гарантує повного запобігання використанню генеративного ШІ.

Загалом, сучасні дослідження демонструють, що детекція не може розглядатися як самодостатнє рішення проблеми академічної доброчесності. Її ефективність є обмеженою як з технічної, так і з етичної точки зору, що обумовлює необхідність переходу від контролю до переосмислення дизайну оцінювання [7, 8]. Це обумовлює необхідність переходу до педагогічно орієнтованих підходів, що розглядаються в наступному розділі.

Трансформація дизайну тестів та альтернативні методи оцінювання. Усвідомлення обмежень детекції стимулювало розробку нових підходів до оцінювання, які є більш резистентними до використання ШІ або навіть інтегрують його як легітимний інструмент навчання.

Підходи до проєктування AI-резистентного оцінювання. У роботі Майка Перкінса [14] запропоновано шкалу оцінювання штучного інтелекту (Artificial Intelligence Assessment Scale, AIAS), що являє собою комплексний підхід до етичної інтеграції генеративного ШІ в освітнє оцінювання. У межах цього підходу завдання класифікуються за рівнем допустимості використання ШІ – від повної заборони до його цілеспрямованого використання як навчального інструменту. Ключова ідея полягає в тому, що ефективно оцінювання в умовах поширення ШІ потребує не універсальних заборон, а чіткого визначення ролі технологій у кожному конкретному завданні.

У дослідженні Я Пін Сяо [15] розроблено підхід до редизайну оцінювання письмових робіт у контексті використання великих мовних моделей, який акцентує увагу на трьох ключових принципах: автентичності, персоналізації та процесуальності. Відповідно до цього підходу, завдання мають відображати реальні або професійно орієнтовані ситуації, враховувати індивідуальний досвід студентів і передбачати оцінювання не лише кінцевого результату, а й процесу його досягнення.

У роботі Тея МакЕдвардса [23] запропоновано узагальнену концепцію оцінювання з урахуванням ШІ, яка охоплює такі виміри, як педагогічна валідність, розвиток технологічної грамотності, етична рефлексія та забезпечення справедливості оцінювання. Такий підхід підкреслює необхідність інтеграції педагогічних і технологічних аспектів у процесі трансформації систем оцінювання.

Принципи AI-резистентного дизайну тестів. Сучасні дослідження демонструють, що ефективність оцінювання в умовах поширення генера-

тивного ШІ значною мірою залежить від дизайну завдань.

Зокрема, у дослідженні Бін Нгуєн Тхана [16] емпірично доведено, що завдання, орієнтовані на вищі рівні когнітивної складності (аналіз, синтез, оцінювання, створення), є більш стійкими до використання ШІ порівняно із завданнями репродуктивного характеру.

Одним із ключових принципів є когнітивна складність вищого порядку. Завдання, що передбачають порівняння, аргументацію, оцінювання альтернатив або прийняття рішень у нових контекстах, суттєво ускладнюють можливість прямого використання згенерованих відповідей.

Важливим є також принцип контекстуалізації та персоналізації. У роботі Я Пін Сяо [15] підкреслено, що завдання, які передбачають інтеграцію особистого досвіду студента, аналіз локальних кейсів або власних навчальних проєктів, є менш вразливими до використання ШІ, оскільки базуються на унікальному контексті.

Ще одним напрямом є мультимодальність завдань, що передбачає використання не лише текстових, а й візуальних, аудіальних або інтерактивних компонентів. Такий підхід підвищує складність автоматизованого генерування відповідей і сприяє більш комплексному оцінюванню знань.

Крім того, важливим є впровадження процесуального оцінювання, яке передбачає аналіз не лише кінцевого результату, але й процесу його створення. Це може включати поетапне виконання завдань, подання чернеток, пояснення логіки розв'язання або усний захист результатів. Такий підхід суттєво знижує можливості неконтрольованого використання генеративного ШІ.

Узагальнення результатів аналізу дозволяє систематизувати основні AI-резистентні підходи до проєктування оцінювання, які наведено в табл. 1.

Представлені підходи відображають перехід від технологічного контролю до педагогічного редизайну оцінювання, орієнтованого на розвиток складних когнітивних навичок та автентичного навчання.

Специфічні стратегії для різних типів тестів. Підвищення стійкості тестів з множинним вибором може досягатися через використання ситуаційних завдань, елементів інтерпретації та варіантів відповідей, що перевіряють глибину розуміння, а не лише відтворення знань [16]. Відкриті завдання з обґрунтуванням логіки відповіді є більш валідними в умовах поширення ШІ, оскільки ускладнюють використання готових згенерованих рішень [15]. Додатковим обмежуваль-

Таблиця 1

Систематизація AI-резистентних підходів до оцінювання у вищій освіті

Підхід	Сутність	Чому резистентний до ШІ	Приклад реалізації	Джерела
Завдання вищих когнітивних рівнів	Орієнтація на аналіз, синтез, оцінювання та створення	Вимагають критичного мислення, аргументації та нестандартних рішень	Порівняння підходів, обґрунтування вибору, кейс-аналіз	Nguyen Thanh et al., 2023
Контекстуалізовані та персоналізовані завдання	Використання індивідуального досвіду, локальних кейсів	ШІ не має доступу до особистого досвіду студента	Аналіз власного проєкту, практики або досвіду	Hsiao et al., 2023
Процесуальне оцінювання	Оцінка не лише результату, а й процесу виконання	Ускладнює повне делегування роботи ШІ	Чернетки, пояснення кроків, усний захист	Hsiao et al., 2023; Sullivan et al., 2023
Автентичне оцінювання	Завдання, наближені до реальних професійних ситуацій	Потребують інтеграції знань і прийняття рішень у складних умовах	Бізнес-кейс, реальна задача з галузі	Perkins et al., 2024
Мультимодальні завдання	Поєднання тексту, графіків, відео, даних	Знижують ефективність текстових моделей	Аналіз діаграми + текстове пояснення	Beltozar-Clemente et al., 2024
Відкриті питання з поясненням логіки	Вимога обґрунтування відповіді	ШІ може генерувати відповідь, але складніше пояснити індивідуальну логіку	“Поясніть, чому обрано саме цей підхід”	Hsiao et al., 2023
Синхронне тестування з обмеженням часу	Часові обмеження та контроль умов	Зменшує можливість використання зовнішніх ресурсів	Онлайн-тест із таймером	Newton & Essex, 2023
Інтеграція ШІ як інструменту	Дозволене використання ШІ з критичним аналізом	Зміщує фокус з контролю на мислення	Проаналізувати відповідь ChatGPT і знайти помилки	Perkins et al., 2024; Oates & Johnson, 2025
Портфоліо з рефлексією	Оцінка довготривалого навчального процесу	Важко повністю автоматизувати	Збір робіт + самоаналіз	Perkins et al., 2024
Усне оцінювання	Діалогова перевірка знань	Вимагає спонтанного мислення	Усний іспит або презентація	Oates & Johnson, 2025

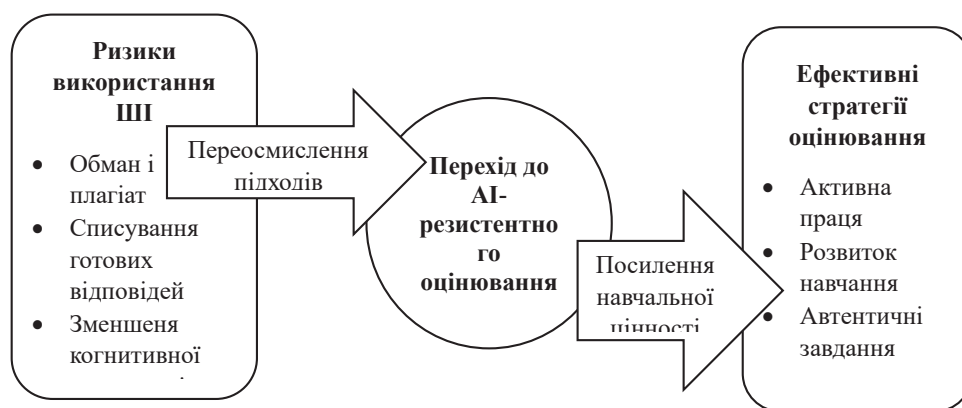


Рис. 1. Концептуальна модель AI-резистентного оцінювання

ним чинником є синхронне тестування з чіткими часовими межами, хоча воно не усуває проблему повністю [1].

Альтернативні методи оцінювання. Дослідження демонструють необхідність диверсифікації методів оцінювання у відповідь на виклики генеративного ШІ. Найбільш ефективними є підходи, що орієнтуються на процес навчання та активну участь студента, зокрема портфоліо

з рефлексією [14], усні форми оцінювання [17], проєктне оцінювання з поетапним контролем [24] та колаборативні формати. Ці методи ускладнюють повну автоматизацію виконання завдань за допомогою ШІ та сприяють розвитку критичного мислення й глибшого розуміння матеріалу.

Інтеграція ШІ як навчального інструменту. Перспективним напрямом є не заборона, а контрольована інтеграція генеративного штучного інте-

лекту в навчальний процес. У дослідженні Майка Перкінса [14] підкреслено, що навчальні завдання можуть передбачати використання ІІІ з подальшим критичним аналізом отриманих результатів, їх перевіркою та адаптацією. Такий підхід сприяє розвитку критичного мислення та формує відповідальне ставлення до використання технологій.

Виклики впровадження нових підходів. Попри теоретичну обґрунтованість АІ-резистентних методів оцінювання, їх практична реалізація супроводжується низкою суттєвих викликів. У роботі Міріам Салліван [24] зазначено, що альтернативні підходи потребують значно більших часових і організаційних ресурсів з боку викладачів, зокрема для розробки складніших завдань, надання індивідуалізованого зворотного зв'язку та багатокритеріального оцінювання результатів. В умовах масового навчання та обмеження ресурсів це ускладнює їх масштабування.

У дослідженні Бін Нгуєн Тханя [16] також підкреслено, що не всі навчальні результати можуть бути ефективно оцінені за допомогою альтернативних методів. Зокрема, оцінювання базових знань і фундаментальних навичок у багатьох випадках і надалі потребує використання тестових форм контролю, які, однак, мають бути адаптовані з урахуванням можливостей генеративного штучного інтелекту.

Водночас сучасні дослідження вказують на те, що трансформація оцінювання не може обмежуватися лише зміною інструментів або форматів завдань. Ефективне впровадження нових підходів передбачає комплексні зміни, включаючи професійний розвиток викладачів, перегляд освітніх практик і формування готовності до експериментування з інноваційними моделями оцінювання [14, 18].

Інституційні політики та педагогічні стратегії. Ефективна відповідь на виклики генеративного штучного інтелекту потребує системних змін на рівні освітніх інституцій і педагогічних підходів [2]. Відсутність чітких політик призводить до неоднозначних практик використання ІІІ, тоді як інституційне лідерство відіграє ключову роль у формуванні етичних підходів [18].

У науковій літературі виокремлюють три основні підходи до регулювання використання ІІІ: рестриктивний, регульований та інтеграційний, який передбачає використання ІІІ як навчального інструменту і вважається найбільш перспективним [14, 18].

Ефективна інституційна політика має включати чіткі правила використання ІІІ, освітній компонент щодо його етичного застосування, під-

тримку викладачів у трансформації оцінювання та врахування специфіки дисциплін [2, 14, 18].

Педагогічні стратегії відіграють ключову роль у забезпеченні академічної доброчесності. Зокрема, формування внутрішньої мотивації студентів [18], зниження навчального стресу та розвиток саморегуляції [6], розвиток критичного мислення у взаємодії з ІІІ [17], а також впровадження формуючого оцінювання [24] сприяють більш відповідальному використанню технологій.

Водночас впровадження нових підходів супроводжується низкою викликів, зокрема підвищеним навантаженням на викладачів, проблемами масштабованості, опором змінам та нерівністю доступу до цифрових ресурсів [2, 18, 24].

Таким чином, трансформація оцінювання в умовах поширення генеративного ІІІ має базуватися на комплексному поєднанні інституційних, педагогічних і технологічних рішень, із фокусом на інтеграцію ІІІ як інструменту розвитку критичного мислення та відповідального використання технологій [14, 17].

Висновки. Сучасні генеративні моделі демонструють високі результати у тестах, що ставить під сумнів валідність традиційного тестування [3, 4]. Студенти активно використовують ІІІ у навчанні, що поєднується з ризиками академічної недоброчесності [1, 6], тоді як існуючі методи детекції залишаються обмежено ефективними [7, 21]. Найбільш перспективним напрямом є трансформація оцінювання через впровадження завдань вищого когнітивного рівня та альтернативних форматів [14–16]. Ефективна стратегія полягає у переході від заборони до інтеграції ІІІ як інструменту розвитку критичного мислення [17].

Практичні рекомендації для закладів вищої освіти України. Короткострокові заходи включають розробку інституційної політики щодо використання ІІІ, підготовку викладачів і студентів до його етичного застосування, а також частковий перехід до синхронного тестування та диверсифікації методів оцінювання.

Середньострокові заходи передбачають створення банків АІ-резистентних завдань, впровадження автентичного та формуючого оцінювання, а також інтеграцію усних форм контролю й завдань із критичним використанням ІІІ.

Довгострокова перспектива полягає у перекладі цілей оцінювання з акцентом на розвиток критичного мислення, креативності та етичної рефлексії, а також у системній інтеграції АІ-грамотності й підтримці викладачів у впровадженні інноваційних підходів.

Напрямки майбутніх досліджень. Систематичний огляд виявив низку ключових прогалин, що можуть бути згруповані у такі напрями.

1. Контекстуальні та емпіричні дослідження. Потребують розвитку дослідження в українському освітньому контексті специфіки використання ШІ студентами та викладачами, аспектів академічної доброчесності, а також дослідження довгострокового впливу трансформації оцінювання на якість навчання та професійну підготовку випускників.

2. Оцінка ефективності та розробка інструментів. Актуальними є порівняльні експериментальні дослідження ефективності різних стратегій AI-резистентного оцінювання, а також розробка

й емпірична валідація нових інструментів оцінювання.

3. Педагогічні та етичні моделі інтеграції ШІ. Подальших досліджень потребує визначення оптимального балансу між контролем і автентичністю оцінювання, а також розробка ефективних педагогічних моделей інтеграції ШІ освітній процес.

Генеративний штучний інтелект не означає кінець тестування, але вимагає його суттєвої трансформації. Перспективним є підхід, у якому ШІ інтегрується як інструмент навчання, а оцінювання фокусується на розвитку критичного мислення, креативності та здатності до безперервного навчання.

Список літератури:

1. Newton P. M., Essex K. Cheating in exams: A comprehensive review of data from 19 studies. *Assessment & Evaluation in Higher Education*. 2023. Vol. 48, No 8. C. 1105–1119. DOI: <https://doi.org/10.1080/02602938.2022.2161391>
2. Dwivedi Y. K., Kshetri N., Hughes L., Slade E. L., Jeyaraj A., Kar A. K. та ін. "So what if ChatGPT wrote it?" Multidisciplinary perspectives on opportunities, challenges and implications of generative conversational AI for research, practice and policy. *International Journal of Information Management*. 2023. Vol. 71. 102642. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2023.102642>
3. Newton P., Xiromeriti M. ChatGPT performance on multiple choice question examinations in higher education. A pragmatic scoping review. *Assessment & Evaluation in Higher Education*. 2024. Vol. 49, No 6. C. 781–798. DOI: <https://doi.org/10.1080/02602938.2023.2299059>
4. Giunti M., Garavaglia F. G., Giuntini R., Sergioli G., Pinna S. ChatGPT as a prospective undergraduate and medical school student. *PLoS ONE*. 2024. Vol. 19, No 10. e0308157. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0308157>
5. Baidoo-Anu D., Ansah L. O. Education in the era of generative artificial intelligence (AI): Understanding the potential benefits of ChatGPT in promoting teaching and learning. *Journal of AI*. 2023. Vol. 7, No 1. C. 52–62. DOI: <https://doi.org/10.61969/jai.1337500>
6. Uppal K., Hajian S. Students' perceptions of ChatGPT in higher education: A study of academic enhancement, procrastination, and ethical concerns. *European Journal of Educational Research*. 2025. Vol. 14, No 1. C. 199–211. DOI: <https://doi.org/10.12973/eu-jer.14.1.199>
7. Malik M. A., Amjad A. I. AI vs AI: How effective are Turnitin, ZeroGPT, GPTZero, and Writer AI in detecting text generated by ChatGPT, Perplexity, and Gemini? *Journal of Applied Learning & Teaching*. 2025. Vol. 8, No 1. C. 45–58. DOI: <https://doi.org/10.37074/jalt.2025.8.1.9>
8. Susnjak T. Maintaining academic integrity in the age of ChatGPT: Challenges and opportunities for online assessments. *Assessment & Evaluation in Higher Education*. 2024. Vol. 49, No 4. C. 456–472. DOI: <https://doi.org/10.1080/02602938.2023.2289089>
9. Yan L. Eight months into reality: A scoping review of the application of ChatGPT in higher education teaching and learning. *Innovative Higher Education*. 2023. Vol. 49, No 2. C. 245–268. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10755-025-09790-4>
10. Mai D. T. T., Da C. V., Hanh N. V. The use of ChatGPT in teaching and learning: A systematic review through SWOT analysis approach. *Frontiers in Education*. 2024. Vol. 9. 1328769. DOI: <https://doi.org/10.3389/educ.2024.1328769>
11. Deng R., Jiang M., Yu X., Lu Y., Liu S. Does ChatGPT enhance student learning? A systematic review and meta-analysis of experimental studies. *Computers & Education*. 2024. 105224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2024.105224>
12. Beltozar-Clemente S., Díaz-Vega E., Zapata-Paulini J., Tejeda-Navarrete R. E. We Can Rely on ChatGPT as an Educational Tutor: A Cross-Sectional Study of its Performance, Accuracy, and Limitations in University Admission Tests. *International Journal of Engineering Pedagogy (iJEP)*. 2024. Vol. 14, No 1. C. 50–60. DOI: <https://doi.org/10.3991/ijep.v14i1.46787>
13. Cotton D. R. E., Cotton P. A., Shipway J. R. Chatting and cheating: Ensuring academic integrity in the era of ChatGPT. *Innovations in Education and Teaching International*. 2023. Vol. 61, No 2. C. 228–239. DOI: <https://doi.org/10.1080/14703297.2023.2190148>

14. Perkins M., Furze L., Roe J., MacVaugh J. The Artificial Intelligence Assessment Scale (AIAS): A framework for ethical integration of generative AI in educational assessment. *Journal of University Teaching and Learning Practice*. 2024. Vol. 21, No 06. Article 03. DOI: <https://doi.org/10.53761/q3azde36>
15. Hsiao Y. P., Klijn N., Chiu M. S. Developing a framework to re-design writing assignment assessment for the era of Large Language Models. *Learning: Research and Practice*. 2023. Vol. 9, No 2. C. 148–158. DOI: <https://doi.org/10.1080/23735082.2023.2257234>
16. Nguyen Thanh B., Vo D. T. H., Nguyen Nhat M., Pham T. T. T., Thai Trung H., Ha Xuan S. Race with the machines: Assessing the capability of generative AI in solving authentic assessments. *Australasian Journal of Educational Technology*. 2023. Vol. 39, No 5. C. 59–81. DOI: <https://doi.org/10.14742/ajet.8902>
17. Oates A., Johnson D. ChatGPT in the classroom: Evaluating its role in fostering critical evaluation skills. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*. 2025. Vol. 35. C. 1793–1824. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40593-024-00452-8>
18. Crawford J., Cowling M., Allen K.-A. Leadership is needed for ethical ChatGPT: Character, assessment, and learning using artificial intelligence (AI). *Journal of University Teaching & Learning Practice*. 2023. Vol. 20, No 3. Article 02. DOI: <https://doi.org/10.53761/1.20.3.02>
19. Jauhainen J. S., Garagorry Guerra A. Generative AI in education: ChatGPT-4 in evaluating students' written responses. *Innovations in Education and Teaching International*. 2025. Vol. 62, No 4. C. 1377–1394. DOI: <https://doi.org/10.1080/14703297.2024.2422337>
20. Maphalala M. C., Nkosi N. Proctoring Online Assessments: Enhancing Security and Academic Integrity in Open Distance eLearning. *Open Praxis*. 2025. Vol. 17, No 4. C. 680–690. DOI: <https://doi.org/10.55982/openpraxis.17.4.911>
21. Mutimukwe C., Viberg O., McGrath C., Cerratto-Pargman T. Privacy in online proctoring systems in higher education: stakeholders' perceptions, awareness and responsibility. *Journal of Computing in Higher Education*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12528-025-09461-5>
22. McEdwards T., Underhill G. R. The element of choice: Online students' perceptions of online exam proctoring. *Online Journal of Distance Learning Administration*. 2025. Vol. 28, No 1.
23. Kılınç S. Comprehensive AI assessment framework: Enhancing educational evaluation with ethical AI integration. *arXiv preprint*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.16887>
24. Sullivan M., Kelly A., McLaughlan P. ChatGPT in higher education: Considerations for academic integrity and student learning. 1. 2023. Vol. 6, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.37074/jalt.2023.6.1.17>

Pyroh M.V., Tereshchuk H.M. THE VALIDITY OF TEST-BASED ASSESSMENT OF STUDENT KNOWLEDGE IN THE AGE OF GENERATIVE ARTIFICIAL INTELLIGENCE: A SYSTEMATIC REVIEW

This article addresses the pressing issue of how generative artificial intelligence affects the validity of student assessment in higher education institutions. The emergence and rapid spread of GPT-type models have posed a serious challenge to traditional methods of knowledge assessment, as modern generative models demonstrate high effectiveness in passing academic tests, especially tasks of a reproductive nature.

Based on a systematic review of scientific publications, this study analyzes key aspects of the use of generative AI models in various types of tests, as well as modern approaches to transforming assessment systems.

The study found that students widely use generative AI when preparing for and taking tests, especially asynchronous online tests. At the same time, automatic text detectors and online proctoring systems have significant limitations in terms of accuracy and reliability, making them insufficiently effective for ensuring academic integrity.

The article justifies the need for a radical rethinking of approaches to test-based assessment. Principles of AI-resistant task design are proposed, based on increased cognitive complexity, personalization, and contextualization of tasks. Alternative assessment methods are systematized.

Based on the analysis, practical recommendations have been formulated for higher education institutions in Ukraine regarding the short-term, medium-term, and long-term transformation of testing and assessment systems in the context of the widespread availability of generative artificial intelligence. Particular attention is paid to the need to shift from a policy of prohibition to a strategy of ethical and pedagogically sound integration of AI into the educational process.

Keywords: generative artificial intelligence, test-based assessment, academic integrity, assessment validity, AI detection, AI-resistant assessment, higher education, online testing, authentic assessment.

Дата першого надходження статті до видання: 17.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

УДК 658.012

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.1/31>**Півторак Д.О.**<https://orcid.org/0000-0003-3708-5610>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лакоза С.Л.<https://orcid.org/0000-0001-6354-1611>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Скорик Є.В.<https://orcid.org/0009-0003-7511-2322>

Акціонерне товариство «Науково-технічний комплекс «Електронприлад»»

ПРОЄКТУВАННЯ ТА ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ВОДИ

Стан питної та технічної води прямо впливає на здоров'я населення, ефективність роботи промислових об'єктів і збереження екологічної рівноваги. У теперішніх умовах зростає потреба у впровадженні сучасних автоматизованих систем, здатних забезпечити комплексну оцінку якості води. Розвиток і вдосконалення таких систем пов'язано із використанням новітніх датчиків та алгоритмів обробки даних, що підвищують ефективність моніторингу й оптимізації процесів водоочищення. Аналіз наукових публікацій дозволив визначити, що найбільш перспективним шляхом розвитку вдосконалення автоматизованих систем покращення якості води є інтеграція системи до Інтернету речей, що надає широкі можливості контролю та збору даних про параметри води у реальному часі. У роботі приведені структурно-функціональні схеми автоматизації та структурна схема автоматизованої системи для покращення якості води. Ці схеми показують загальні технічні рішення, які були використані на першому етапі проектування системи. Автоматизована система покращення якості води включає в себе наступні основні елементи: первинний резервуар; блок попереднього фільтрування; основні ємності для очищеної води; системи та контури остаточного очищення; підсистема подачі води споживачу, яка доставляє очищену воду до точки споживання; мікроконтролер та набір датчиків. Було виконано макетування, калібрування та випробування частини спроектованої системи, а саме зібрано макет підсистеми моніторингу для автоматизованої системи (без урахування фільтрів). Він містить центральний модуль Arduino Nano, датчик кислотності PH0-14 probe, датчик каламутності TS 300B, датчик температури DS18B20 та датчик солоності DFRobot TDS Meter V1.0. Обрані компоненти є простими в експлуатації, широкодоступними та мають невисоку ціну. Для макету підсистеми моніторингу розроблена схема підключення датчиків до плати Arduino Nano. Приведено експериментальні дані та оцінено калібровочні коефіцієнти лінійних моделей вихідних сигналів датчиків. У статті описані рекомендації щодо вибору фільтрів води відповідно до можливих завдань чи сценаріїв використання автоматизованої системи для покращення якості води.

Ключові слова: якість води, комплексна оцінка, автоматизована система, калібрування, тестування датчиків.

Постановка проблеми. Контроль якості води є одним із ключових завдань сьогодення, адже від стану питної та технічної води безпосередньо залежать здоров'я населення, ефективність роботи промислових об'єктів і збереження екологічної рівноваги. За умов посилення антропогенного

навантаження, кліматичних змін і обмеженості природних ресурсів зростає потреба у впровадженні сучасних автоматизованих систем, здатних забезпечити швидку, точну та комплексну оцінку якості води. Розвиток і вдосконалення таких систем із використанням новітніх датчиків та алго-

ритмів обробки даних сприятимуть підвищенню ефективності моніторингу й оптимізації процесів водоочищення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У теперішній час для контролю якості води отримали широке застосування методи моніторингу, які дозволяють отримувати більш достовірні та оперативні дані про стан якості води в реальному часі.

Одними з таких методів є традиційні методи, до яких відносяться [1, с.33]:

1. Відбір проб з водних об'єктів з подальшим проведенням лабораторних досліджень, який є одним з найпоширеніших з традиційних методів.
2. Польові тестові засоби, зокрема тест-смужки та портативні аналізатори, які дають змогу оперативно оцінювати окремі хімічні параметри, такі як значення рН, вміст розчиненого кисню, електролітів і токсичних компонентів.

Другим шляхом проведення моніторингу водного середовища є цифрові методи, які передбачають використання автоматизованих систем (наприклад, системи з датчиками, які мають можливість працювати в режимі реальному часі та системи моніторингу з використанням сучасних технологій, таких як Інтернет речей (IoT), хмарні обчислення) [1, с.34].

У роботах [1, с.34; 2, с.10; 3, с82] зазначено низку недоліків застосування традиційних методів та наведені суттєві переваги цифрових систем контролю якості води в порівнянні з традиційними методами. Застосування сучасних цифрових технологій сприяє підвищенню точності, оперативності та ефективності спостережень, а також розширює можливості своєчасного виявлення забруднень і змін у стані водного середовища.

Аналіз наукових публікацій дозволив визначити основний напрямок розвитку та вдосконалення автоматизованих систем покращення якості води: застосування технологій Інтернет речей, що забезпечить підключення датчиків до мережі Інтернет та надасть можливість проводити контроль та збір даних про параметри води зі станції моніторингу [3, с.83; 4, с.58; 5, с.2].

Більшість досліджень, які були розглянуті у сучасних наукових публікаціях пропонують вдосконалення певних складових автоматизованих систем моніторингу певних параметрів води, без можливості гнучкого оперативного налаштування під конкретний об'єкт при забезпеченні невисокої вартості комплексу. Таким чином, розробка автоматизованого малогабаритного комплексу з гнучкою можливістю вибору/підключення

вимірювальних систем для оптимальної оцінки якості води шляхом оптимального підбору чутливих елементів є актуальним завданням. Розроблювальна система має бути простою та зрозумілою для використання та експлуатації широким колом не підготовлених осіб.

Постановка завдання. Метою статті є проектування автоматизованої системи для покращення якості води, фізичне моделювання первинних систем отримання інформації про параметри води.

Виклад основного матеріалу

Розроблення структурно-функціональної схеми автоматизації

Проектування автоматизованих систем є складним інтегральним процесом, який має враховувати велику кількість факторів, що визначаються об'єктом автоматизації, необхідним рівнем автоматизації, вимогами діючих нормативних документів, вимогами споживача чи замовника та існуючим переліком технічних засобів для втілення системи у реальну працюючу технічну систему. При цьому при реалізації комплексу мають застосовуватися добре відомі рішення, засоби які широкодоступні і наявні на ринку. Використовувані технічні компоненти мають одночасно відповідати сучасному рівню систем автоматизації, які використовують мікропроцесорні засоби, і при цьому обране рішення має мати високі економічні показники, бути уніфікованим і досить простим для обслуговування інженерним персоналом різного рівня кваліфікації. Ці ідеї та підходи при проектуванні автоматизованої системи для покращення якості води мають бути відображені у відповідному технічному рішенні. На першому етапі проектування системи це дозволяють відобразити різноманітні схеми, зокрема структурна та структурно-функціональна схеми автоматизації.

Автоматизована система покращення якості води включає в себе такі основні елементи:

1. Первинний резервуар, куди вода надходить із зовнішньої мережі через керовану засувку.
2. Блок попереднього фільтрування, що виконує первинну підготовку води перед подальшим очищенням.
3. Основні ємності для очищеної води, в яких зберігається вода після проходження фільтрації.
4. Системи та контури остаточного очищення, що забезпечують доведення якості води до встановлених стандартів.
5. Підсистема подачі води споживачу, яка доставляє очищену воду до точки споживання.

На рис. 1 зображена структурна схема автоматизованої системи для покращення якості води.

Структурно-функціональна схема автоматизації системи для покращення якості води, відповідно до структурної схеми (на рис. 1), наведена на рис. 2 [6, с.34] та складається з таких елементів:

1. Первинний резервуар, на якому встановлені датчики:

1) Датчик рівня LE (1a) – відповідає за підтримання рівня води у первинному резервуарі до заданої межі. Регулювання здійснюється контуром, який включає: датчик рівня LE (1a), прилад дистанційної передачі сигналу LT (1б), елемент системи LCA (1в), що сигналізує користувачу та має силові виходи до двигуна 2, який керує входною засувкою.

2) Датчик температури ТТ – передає інформацію на промисловий логічний контролер (ПЛК) та персональний комп'ютер (ПК) для обробки, реєстрації й інформування користувача про значення температури.

3) Датчик складу QE (4a) – вимірює каламутність води в первинному резервуарі.

2. Подача на блок первинного фільтрування.

Подача води здійснюється нагнітачем з двигуном М (лінія 5), який забезпечує потік до засувки 32 та 33. Тиск у магістралі контролюється датчиком диференційного тиску, що дозволяє фіксувати показники після первинного резервуару.

Розгалуження потоку:

- Якщо каламутність перевищує норму – відкривається засувка 32, вода подається на фільтр

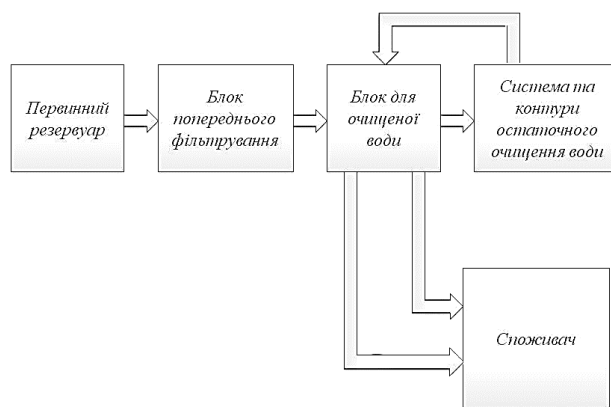


Рис. 1. Структурна схема автоматизованої системи для покращення якості води

швидкої дії з комбінованим завантаженням Ф1.

- Якщо показники в межах норми – вода йде через 33 до ємності з очищеною водою.

3. Блок з очищеною водою (БОВ), на який встановлені:

1) датчик рівня LE (7a), який контролює заповнення. У контур регулювання входять: датчик рівня LE (7a); приладу дистанційної передачі сигналу LT (7б); елемент системи LCA (7в), сигналізує та керує приводами 32 і 33. Команди передає ПЛК по лінії С.

2) датчики якості води QE: QE (8a) – датчик кислотності, QE (9a) – датчик вмісту солей, QE (10a) – датчик каламутності. Дані надходять через компоненти QT (8б–10б) на ПЛК і ПК.

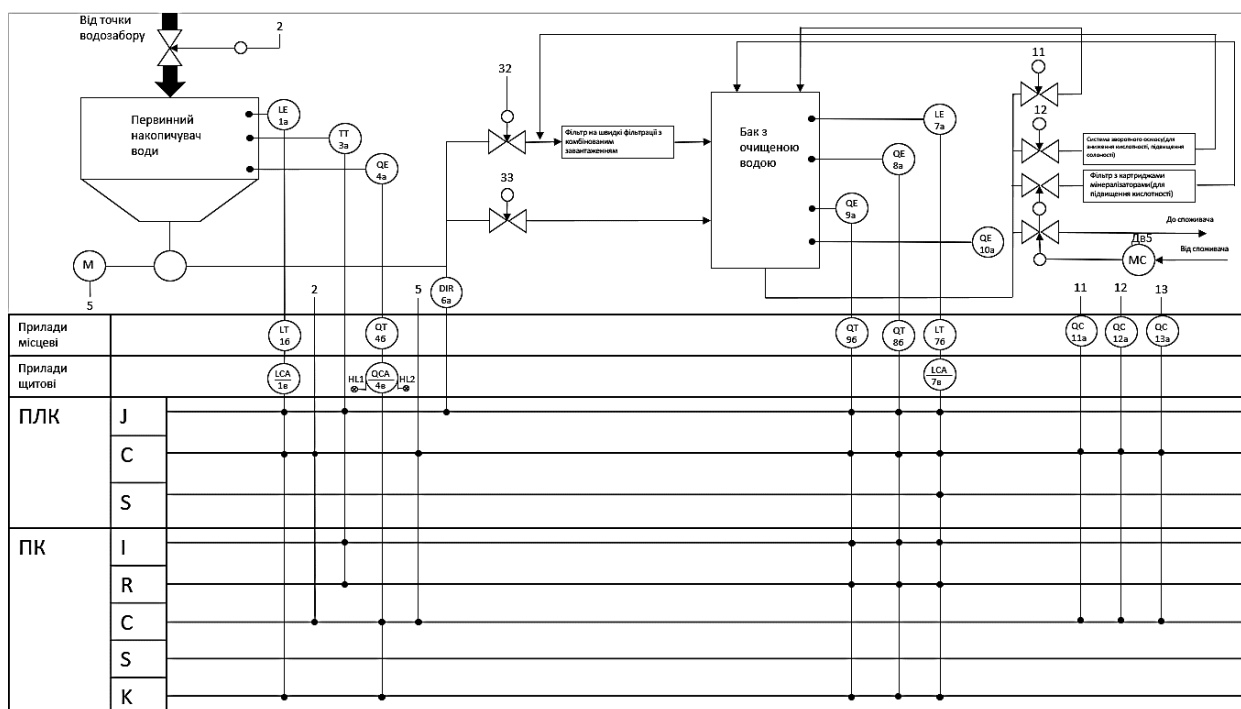


Рис. 2. Схема автоматизації системи для покращення якості води

Алгоритм обробки в ПЛК:

- Оцінюється якість води за параметрами.
- За потреби виконується повторна фільтрація через систему остаточного очищення, яка керується силовими модулями QC (11в–13в).

4. Системи та контури остаточного очищення води складаються з: фільтрів з картриджами-мінералізаторами, які підвищують кислотність; системи зворотного осмосу, яка знижує рН та підвищує вміст солей.

5. Підсистема подачі води до споживача. Подача води здійснюється через вихідну помпу з двигуном Дв5, керовану дистанційною електросистемою.

Вибір чутливих елементів підсистеми моніторингу для автоматизованої системи покращення якості води

Макет підсистеми моніторингу для автоматизованої системи (без урахування фільтрів) (рис. 3) містить мікроконтролер, датчик кислотності, датчик каламутності, датчик температури та датчик солоності.

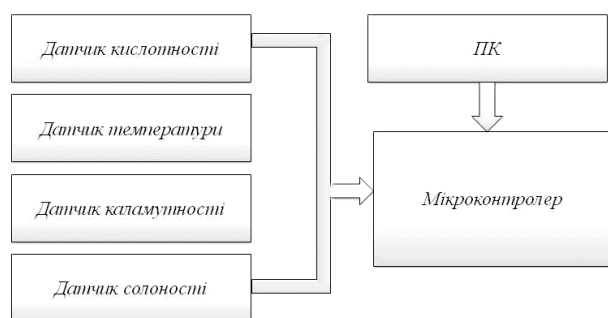


Рис. 3. Структурна схема підсистеми моніторингу

На основі проведеного огляду та аналізу існуючих компонентів [6, с.35-51; 7, с.201-202], для розробки макету підсистеми моніторингу для автоматизованої системи покращення якості води було обрано:

1. Центральний модуль – Arduino Nano.

Усі датчики передають аналогові сигнали, які обробляються Arduino Nano. Він також виконує функцію передачі зібраних даних на персональний комп'ютер для подальшої обробки й візуалізації.

2. Датчик кислотності PH0-14 probe. Даний датчик обрано завдяки його сумісності з мікроконтролерною платою Arduino Nano. Він забезпечує точний моніторинг рівня кислотності води (pH), який є критично важливим параметром для визначення її якості.

3. Датчик температури DS18B20. Вибір цього датчика зумовлений його оптимальним діапазо-

ном вимірювання температури; герметичністю, що дозволяє використовувати його безпосередньо у водному середовищі; доступною вартістю.

Датчик DS18B20 дозволяє здійснювати постійний контроль температури води в режимі реального часу.

4. Датчик каламутності TS 300B. Даний датчик обрано із-за його простоти в експлуатації, широкоступності та невисоку ціну.

Датчик TS 300B дає змогу дистанційно відстежувати рівень каламутності води. Це особливо важливо у випадках, коли візуальна оцінка неможлива.

5. Датчик солоності DFRobot TDS Meter V1.0. Даний датчик використовується для вимірювання загального вмісту розчинених солей у воді (TDS). Він дозволяє оперативно визначати такий важливий показник якості води, як її рівень мінералізації. DFRobot TDS Meter V1.0 сумісний із мікроконтролерами платформи Arduino, що робить його зручним для інтеграції в систему автоматизованого моніторингу.

На рис.4 зображена схема підключення датчиків до плати Arduino Nano [6, с. 54].

Тестування та калібрування датчиків підсистеми моніторингу автоматизованої системи для покращення якості води

Експериментальні дослідження було виконано за допомогою макету автоматизованої системи. На рис. 5 наведено схематичне зображення розробленого прототипу, де 1 – датчик температури; 2 – датчик кислотності; 3 – датчик солоності; 4 – датчик каламутності [6, с.66].

1) Калібрування та перевірка датчика солоності DFRobot TDS Meter V1.0

Для калібрування датчика солоності було проведено 5 вимірів із заздалегідь підготовленими сольовими розчинами 0, 250, 500, 1000, 1500 мг/л. У сольовий розчин було занурено щупи та порівняно отримані результати з еталонами. Еталонні значення солоності формувалися згідно методики описаної в роботі [8]. Результати вимірювання наведено в табл. 1

Використовуючи експериментальні дані було побудовано статичну. За експертною оцінкою дослідника видно, що отримана характеристика може бути апроксимована обраною лінійною функцією $y = kx + y_0$ з високою точністю. Була виконана оцінка масштабного коефіцієнта (k) та зміщення нуля (y_0). Масштабний коефіцієнт – $k=0.99941$. Зміщення нуля $y_0=9.181$ показує невелике систематичне відхилення (похибку) результатів, яке необхідно враховувати при калібруванні.

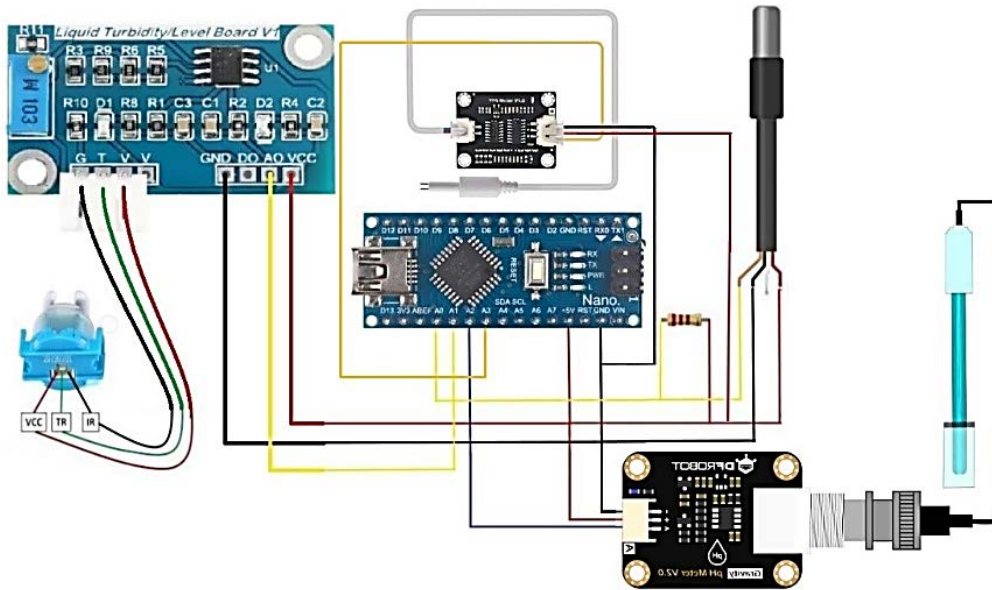


Рис. 4. Схема підключення датчиків до плати Arduino Nano

Таблиця 1

Результати вимірювання для датчика солоності

Еталонне значення (мг/л)	Отримані результати (мг/л)
0	15
250	263
500	489
1000	1021
1500	1506

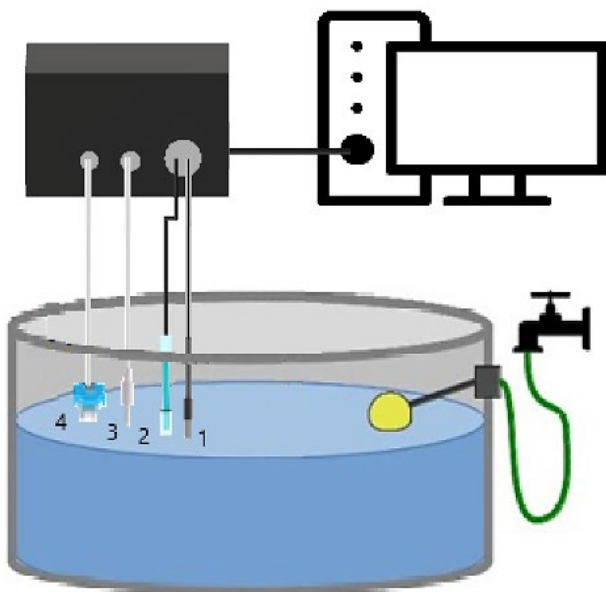


Рис. 5. Схематичне зображення прототипу

2) Калібрування та перевірка датчика кислотності PH0-14

Для калібрування та перевірки працездатності датчика кислотності було проведено 3 виміри зі заздалегідь підготовленими розчинами з кислотністю 4, 7, 10 рН, зображених на рис. 6.

У розчини було занурено щупи та порівняно отримані результати з еталонними. Еталонні значення кислотності формувалися згідно методики описаної в роботі [9]. Результати наведено в табл. 2.



а)



б)



в)

Рис. 6. Розчини з різною кислотністю:
а) 4 рН; б) 7 рН; в) 10 рН

Таблиця 2

Отримані результати датчика кислотності

Еталонне значення(pH)	Отримані результати (pH)
4	4.2
7	6.9
10	10.4

Відповідно до даних з таблиці 2 було оцінено коефіцієнти статичної характеристики ($y = kx + y_0$) аналогічно датчику солоності. Масштабний коефіцієнт становить $k=1.0333$ і свідчить про невелике завищення вимірювань датчика відносно еталонних значень (на 3,33%). Для корекції вихідні дані датчика треба домножити на коефіцієнт $1/k$.

Зміщення ($y_0 = -0.0667$) є мінімальним і майже не впливає на точність.

3) Перевірка працездатності датчика каламутності TS 300B

Для перевірки працездатності датчика каламутності було проведено 10 вимірів з заздалегідь підготовленими мильними розчинами з додаванням різної кількості рідкого мила. Відповідна кількість доданого в розчин рідкого мила та отримані результати вимірювання зануреного у мильні розчини датчика каламутності приведені в таблиці 3. Використовувані розчини показано на рис. 7. Експеримент виконувався відповідно до роз'яснень стосовно визначення кількості одиниць каламутності NTU у роботі [10].

Рекомендації щодо використання фільтрів

Важливим елементом для роботи автоматизованої системи покращення якості води є використовувані в ній фільтри. Використовуючи функціональну схему автоматизації системи моніторингу параметрів якості води, можна надати наступні

Таблиця 3

Результати вимірювання з датчика каламутності

Вода з рідким милом (г)	Отримані результати(NTU)
0	34
35	104
70	207
105	263
140	273
210	374
245	377
280	432
315	439
350	470

рекомендації щодо вибору фільтрів відповідно до виконуваних завдань чи сценаріїв використання розглядуваної системи [6, с.84].

1. Фільтр для швидкої фільтрації з комбінованим завантаженням (Ф1):

Призначення: Видалення великих суспендованих часток та зниження каламутності води.

Випадки використання:

- Калібрування датчика каламутності QE (4a) (рис.2) показує значення каламутності вище допустимого рівня.

- Вода в первинному накопичувачі містить візуально помітні забруднення.

- Необхідно швидко попереднє очищення перед подальшою тонкою обробкою.

Переваги:

- Швидке очищення великих об'ємів води.
- Можливість роботи з високим ступенем забрудненості.

2. Фільтри з картриджами-мінералізаторами:



Рис. 7. Розчини з різною кількістю рідкого мила

Призначення: Підвищення кислотності води (корекція рівня рН).

Випадки використання:

- Датчик кислотності QE (8a) (рис.2) фіксує значення рН нижче оптимального (наприклад, для питної води це 6.5–8.5).
- Необхідно покращити органолептичні властивості води (смак, запах).

Переваги:

- Дозволяє відновити мінеральний склад води.
- Простий у обслуговуванні та заміні картриджів.

3. Система зворотного осмосу:

Призначення: Видалення розчинених солей, важких металів, бактерій та зниження рівня рН.

Випадки використання:

- Датчик солей QE (9a) (рис.2) показує концентрацію вище допустимої норми.
- Вода містить надлишок органічних і неорганічних домішок, які не усуваються іншими методами.
- Необхідно забезпечити глибоке очищення для лабораторних або медичних потреб.

Переваги:

- Гарантує найвищий рівень очищення системи для підвищення якості води.

- Ефективний для видалення домішок навіть у дуже забрудненій воді.

Недоліки:

- Вимагає великих витрат енергії.
- Знижує загальну мінералізацію води, що може вимагати повторного збагачення корисними елементами.

Висновки. У даній роботі:

1. Розроблена структурна та структурно-функціональна схеми автоматизованої системи для покращення якості води. Вони відображають логіку взаємодії між окремими компонентами системи, способи їх підключення, а також послідовність автоматизованих процесів системи. Схеми демонструють, як реалізується автоматичний збір, обробка, збереження даних та автоматизовані зворотні зв'язки по параметрам води, що дозволяє забезпечити ефективний контроль якості води в режимі реального часу.

2. Виготовлено макет підсистеми моніторингу автоматизованої системи для покращення якості води, який забезпечує можливість вимірювання температури, каламутності, кислотності, вмісту солей.

3. Проведено тестування та калібрування датчиків підсистеми моніторингу автоматизованої

Список літератури:

1. Корніюк А.В. Цифровий моніторинг якості води, виклики та рішення / А.В. Корніюк, І.Г. Пацева // Екологічні науки. 2023. № 4 (49). С. 32-37.
2. Смарт система спостереження якості води // Кваліфікаційна робота освітнього рівня «Бакалавр» // Личук Інна Андріївна // Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, факультет комп'ютерноінформаційних систем і програмної інженерії, кафедра комп'ютерних наук, група СН-42 // Тернопіль, 2025. С. 70.
3. Корпильов Д. Розробка інтелектуальної системи моніторингу водних ресурсів / Д. Корпильов, А. Здобицький, О. Мокрицька, В. Чернюх // Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. 2025. Вип. 7, № 1. С.81-93.
4. Защепкіна Н.М. Розробка прототипу інформаційно-вимірювальної системи для експрес-вимірювання нітратів в рідині / Н.М. Защепкіна, Д. Мельниченко // Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». 2023. №1. С. 58-63. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-75-6>
5. D. Korpiljov, A. Zdobytsky, U. Marikutsa, V. Tomyuk, R. Panchak. Interactive system of surface water monitoring using IoT technologies // Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. 2022. Вип. 4, № 1. С. 1–8. <https://doi.org/10.23939/cds2022.01.001>
6. Скорик Є.В. Автоматизована система комплексного моніторингу параметрів якості води : дипломна робота ... магістра : 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, Київ, 2024, 119 с.
7. Скорик Є.В., Півторак Д.О. Автоматизована система контролю якості води. *Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні*, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023, С. 201-204.
8. ISO 10359-2:2017 Water quality –Determination of dissolved salts –Part 2: Conductimetric method. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/18417/535c19a2556a42e880054117cd3c52ac/ISO-10359-2-1994.pdf>.
9. ISO 10523:2012 Water quality –Determination of pH. URL: http://higiene.unex.es/Bibliogr/ISO_BS_USDA/ISO_BS/BS%20EN%20ISO/BS%20EN%20ISO%2010523-2012.pdf.
10. How to interface turbidity module with arduino | complete tutorial | DIY Turbidity meter. URL: https://www.youtube.com/watch?v=BYzRiUvX6I&ab_channel=EDISONSCIENCECORNER.

Pivtorak D.O., Lakoza S.L., Skoryk Ye.V. DESIGN AND PHYSICAL MODELING OF THE IMPROVING WATER QUALITY AUTOMATED SYSTEM

The state of drinking and industrial water directly affects public health, the operational efficiency of industrial facilities, and the preservation of ecological balance. In current conditions, there is a growing need for the implementation of modern automated systems capable of providing a comprehensive assessment of water quality. The development and improvement of such systems are linked to the use of the latest sensors and data processing algorithms that increase the efficiency of monitoring and optimization of water treatment processes. Analysis of scientific publications has determined that the most promising path for improving automated water quality enhancement systems is integration into the Internet of Things, which provides broad opportunities for control and real-time data collection on water parameters. The work presents the structural-functional automation diagrams and the structural diagram of the automated water quality improvement system. These diagrams demonstrate the general technical solutions used during the first stage of system design. The automated water quality improvement system includes the following main elements: a primary reservoir; a pre-filtration unit; main tanks for purified water; systems and circuits for final treatment; a water supply subsystem that delivers purified water to the point of consumption; a microcontroller; and a set of sensors. Prototyping, calibration, and testing of a part of the designed system were performed, specifically, a prototype of the monitoring subsystem for the automated system (excluding filters) was assembled. It contains an Arduino Nano central module, a PH0-14 pH probe, a TS 300B turbidity sensor, a DS18B20 temperature sensor, and a DFRobot TDS Meter V1.0 salinity sensor. The selected components are easy to operate, widely available, and low-cost. For the monitoring subsystem prototype, a connection diagram for the sensors to the Arduino Nano board has been developed. Experimental data are presented, and the calibration coefficients of linear models for the sensor output signals are evaluated. The article describes recommendations for selecting water filters according to possible tasks or usage scenarios of the automated water quality improvement system.

Keywords: water quality, complex estimation, automated system, calibration, sensor testing.

Дата першого надходження статті до видання: 10.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

УДК 004.02:519.816:004.43

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.1/32>**Превисокова Н.В.**<https://orcid.org/0000-0002-8047-4278>

Карпатський національний університет імені Василя Стефаника

Семаньків М.В.<https://orcid.org/0000-0002-1314-8923>

Карпатський національний університет імені Василя Стефаника

Ізмайлов А.В.<http://orcid.org/0000-0002-6165-7490>

Карпатський національний університет імені Василя Стефаника

МОДЕЛЬ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРО ОЦІНКУ ЖИТЛОВОЇ НЕРУХОМОСТІ НА ОСНОВІ ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ АНАЛІЗУ ДАНИХ І ПРОГНОЗУВАННЯ

У статті розроблено та науково обґрунтовано інтелектуальну модель прийняття рішень щодо визначення ціни житлового нерухомого майна в умовах ризику. Ключовою особливістю запропонованого підходу є інтеграція спеціалізованої програмної системи прогнозування та аналізу ціни об'єкта житлової нерухомості безпосередньо у процес прийняття рішень. Розроблена програмна система реалізує повний цикл опрацювання даних: від автоматизованого збору слабкоструктурованої інформації про подібні об'єкти на ринку Івано-Франківської області з відкритих джерел, аналізу істотних характеристик, які впливають на ціну, до формування прогнозованої ціни конкретного об'єкта. Прогнозування вартості об'єктів здійснюється на основі алгоритмів машинного навчання, зокрема відомих ансамблевих методів *Random Forest*, *Gradient Boosting*, розробленого методу на основі комбінації двох ансамблевих методів (*Random Forest* і *Gradient Boosting*) та архітектур багатословових нейронних мереж. Запропонована модель прийняття рішень є комплексною і охоплює ряд послідовних етапів: ідентифікацію та аналіз альтернативних варіантів нерухомості, прогнозування ціни конкретного об'єкта, оцінювання ризиків та потенційних коливань вартості під впливом факторів невизначеності. Увагу приділено аналізу відхилень прогнозованих значень від фактичних ринкових показників, що дозволяє адаптуватися до неоднорідності даних. На основі отриманих результатів модель генерує обґрунтовані рекомендації щодо доцільності купівлі, продажу або інвестування, що базуються на об'єктивній оцінці ринкової кон'юнктури. Впровадження розробленої моделі та програмного інструментарію дозволяє учасникам ринку нерухомості, покупцям, продавцям, ріелторам та інвесторам суттєво мінімізувати фінансові ризики, пов'язані з помилками суб'єктивного оцінювання. Наукова новизна роботи полягає у розробці моделі системи, що забезпечує наскрізний процес підтримки прийняття рішень в умовах волатильного регіонального ринку.

Ключові слова: модель прийняття рішень, прогнозування цін на нерухомість, аналіз даних, лінійна регресія, програмна реалізація, *Python*, методи машинного навчання, нейронна мережа.

Постановка проблеми. Ринок житлової нерухомості є одним із найбільш динамічних та складних сегментів економіки, стабільність якого безпосередньо впливає на інвестиційний клімат та соціальний добробут населення. Продавцям і покупцям важливо визначити оптимальну ціну продажу чи купівлі конкретних об'єктів нерухомості, кредиторам – оптимальні розміри позик,

банкам – вартість забезпечення і ступінь ризику [1, с.157, 2, с.77] за наявності невизначеності і різних даних про ціни подібних об'єктів у відкритих джерелах. В умовах високої волатильності ринку, зумовленої макроекономічними чинниками та регіональною специфікою, традиційні методи оцінки часто виявляються недостатньо гнучкими. До факторів, які традиційно впливали на ціноут-

ворення житла в Україні, додалися фактори динамічної зміни співвідношення попиту та пропозиції, валютних коливань, психологічні та фактори зовнішніх подій, зумовлені пандемією та війною [2, с.75, 3-4]. Зокрема, протягом останніх років зростає попит та ціна на об'єкти нерухомості в умовно спокійніших західних регіонах України, зокрема, в Івано-Франківській області [2, с.79, 3-4]. Це зумовлює потребу у розробці нових моделей прийняття рішень в умовах невизначеності та ризику і впровадженні інтелектуальних систем, які підтримують процеси прийняття рішень в галузі нерухомості, що дозволить покупцям, продавцям та інвесторам мінімізувати ризики та обґрунтовувати фінансові операції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження стосуються математичних моделей ціноутворення об'єктів нерухомості, аналізу факторів, які впливають на ціну, та систем прогнозування цін і є предметом досліджень вітчизняних та зарубіжних вчених. Аналіз ціноутворення на ринку нерухомості розглядається в роботах [1, 2], аналіз стану ринку України та локального ринку нерухомості здійснено в звітах і оглядах [3, 4]. Застосування автоматизованих моделей оцінки в Україні розглянуто в [5]; застосування алгоритмів машинного навчання для прогнозування цін на нерухомість – в [6-8]; застосування нейронних мереж для прогнозування цін на нерухомість – в роботах [9, 10]. Аналіз досліджень показує, що актуальними є регресійні методи прогнозування цін на нерухомість з використанням алгоритмів машинного навчання та нейронних мереж, оскільки вони можуть виявляти нелінійні залежності між ціною та численними ознаками (локація, інфраструктура, технічні параметри об'єкта).

Незважаючи на значну кількість досліджень у галузі прогнозування цін на нерухомість, актуальним залишається питання інтеграції прогнозних моделей у комплексні моделі і системи підтримки прийняття рішень, які б забезпечували повний цикл обробки даних: від автоматизованого збору даних з слабкоструктурованих джерел до розгортання доступних вебсервісів для кінцевого користувача із персоналізованим формуванням рекомендацій щодо фінансових операцій з нерухомістю.

Постановка завдання. Метою роботи є розроблення моделі прийняття рішень про оцінку житлової нерухомості в умовах ризику з використанням програмної системи аналізу даних і прогнозування цін на основі методів машинного

навчання і нейронних мереж, яка автоматизує оцінку вартості об'єктів, враховуючи велику кількість ціноутворюючих факторів. Модель дозволяє покупцям, продавцям та інвесторам обґрунтувати рішення щодо фінансових операцій з житлом і мінімізувати ризики.

Виклад основного матеріалу. Пропонована модель прийняття рішень про ціну житлового нерухомого майна включає чотири основні етапи:

1. Збір та підготовка даних. Збір даних з порталів нерухомості про об'єкти житлової нерухомості, ціни і характеристики, які впливають на ціну. Попередня обробка даних, аналіз даних, формування множини варіантів.

2. Прогнозне моделювання. Використання програмної системи прогнозування для визначення ймовірної вартості об'єкта.

3. Аналіз відхилень. Порівняння прогнозованої ціни з фактичною ринковою пропозицією для виявлення переоцінених або недооцінених варіантів. Аналіз ситуацій в умовах ризику.

4. Формування стратегії. Прийняття рішення про купівлю або продаж на основі отриманих прогнозів та аналізу тенденцій ринку.

Математично модель можна представити як функцію

$$D = f(X, Y, P_{pr}, S, R, C) \quad (1)$$

де X – множина альтернативних рішень; Y – векторний критерій оцінювання альтернатив; P_{pr} – прогноз ціни, згенерований програмною системою; S – множина імовірних ситуацій зовнішнього середовища, R – коефіцієнт ризику та ринкової невизначеності, який враховує динамічність ринку нерухомості; C – множина обмежень у задачі (бюджет, терміни), D – прийняте рішення, f – функція відображення.

Етап 1. Збір та підготовка даних. На першому етапі здійснюється збирання деталізованої інформації про об'єкти та їх ціну з порталів нерухомості, таких як ЛУН, DOM.ria, Flatfy, Rieltor.ua. Портали містять актуальні пропозиції об'єктів та характеристики, які впливають на його вартість: тип об'єкта (в новобудові чи вторинному фонді), площа, розташування, стан об'єкта, рік побудови, кількість кімнат, матеріал будови, поверх, інфраструктура тощо. Формуються критерії вибору або фільтрації на порталах, визначаються найвагоміші критерії. В результаті формується масив допустимих об'єктів або обирається один об'єкт.

Етап 2. Прогнозне моделювання. На другому етапі використовується програмна система аналізу

даних та прогнозування ціни на нерухомість, яка розроблена на основі системи, описаної в роботі [11, с. 102]. Система прогнозування базується на модульній архітектурі, що охоплює повний цикл обробки даних: від автоматизованого збору інформації до візуалізації прогнозів. Системна архітектура ґрунтується на декомпозиції функціоналу на логічні блоки, що забезпечують поетапну обробку даних. Такий підхід забезпечує масштабованість, спрощує технічну підтримку.

Перший модуль збору даних забезпечує автоматизоване збирання інформації про нерухомість з відкритих джерел, використовуючи незалежні парсери для сайтів DOM.RIA та Flatfy. Дані для навчання і прогнозування збираються автоматизовано з використанням інструментів веб-скрапінгу, після чого проходять багаторівневу обробку за методикою [6, с. 871]. Модулі реалізовані на основі спільного базового класу, що передбачає інтегрування інших джерел даних.

У даному дослідженні використовувався набір даних про об'єкти житлової нерухомості Івано-Франківської області з платформ DOM.RIA та Flatfy для побудови моделей прогнозування ціни на житло в цьому регіоні з використанням множини ознак.

Процес попередньої обробки даних [6, с. 871; 12, с. 231] реалізований в окремому модулі, включає усунення пропущених значень, фільтрацію помилкових і записів з нереалістичними значеннями характеристик, уніфікацію параметрів, перетворення до безрозмірних шкал, кодування категоріальних ознак та нормалізацію числових даних для навчання моделей.

Характеристик, які впливають на вартість житлової нерухомості, є досить багато. Найбільш важливими вважаються [1, с. 212; 6, с. 872; 8, с. 2139] площа, фізичний стан, зона розміщення (відстань до центру, район), термін експлуатації, кількість кімнат, матеріал, з якого виготовлено будинок, поверх, на якому розміщено житло, кількість поверхів, наявність інфраструктури та ін.

На даному етапі попередньої обробки здійснювався кореляційний аналіз, щоб виявити і дослідити залежність між значеннями характеристик і сформувати кінцеву множину істотних характеристик об'єктів, які впливають на ціну. На рисунку 1 наведено діаграму залежності ціни об'єкта від площі у кінцевому наборі даних, який використаний для навчання моделей прогнозування.

У результаті оброблення вхідних даних одержано і сформовано набір даних, який містить основні інформативні ознаки об'єктів житлової

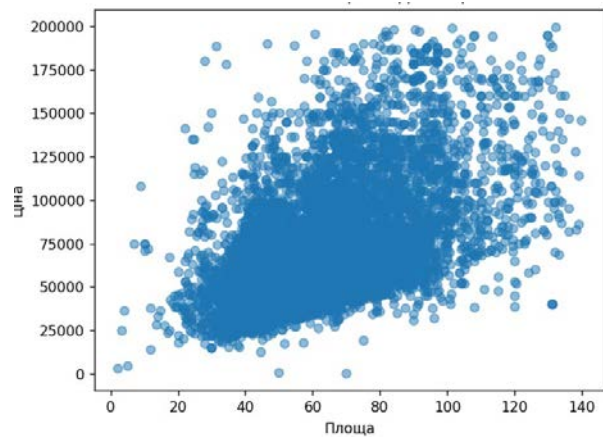


Рис. 1. Залежність ціни об'єкта від площі

нерухомості Івано-Франківської області. Цей підготовлений набір даних використовується для навчання моделей прогнозування.

Модуль зберігання даних функціонує на основі документоорієнтованої бази даних MongoDB, яка забезпечує зберігання інформації у форматі JSON та роботу зі слабкоструктурованою інформацією, використання асинхронної бібліотеки Motor для взаємодії з базою даних гарантує високу продуктивність при обробці великих обсягів інформації. Кожне оголошення із порталу нерухомості подається у вигляді окремого JSON-документа.

Прогнозування ціни об'єкта нерухомості реалізується в окремому модулі з використанням методів машинного навчання та нейронних мереж.

Серед відомих методів визначення ринкової вартості об'єкта житлової нерухомості, таких як порівняльний, витратний та нормативний, обрано і програмно реалізовано у системі порівняльний метод [1, с.194]. Порівняльний метод ґрунтується на визначенні ціни шляхом порівняння оцінюваного об'єкта з аналогами на ринку [1, с.195]. Ціна формується як середньозважене значення цін об'єктів-аналогів [1, с.207] із врахуванням коригувальних коефіцієнтів:

$$P_B = \sum_{i=1}^n w_i \cdot P_{Ai}$$

де P_B – ринкова вартість оцінюваного об'єкта, n – кількість об'єктів-аналогів, P_{Ai} – відома ціна i -го об'єкта-аналога, який використовується для порівняння; w_i – ваговий коефіцієнт подібності між оцінюваним об'єктом та аналогом.

У контексті Івано-Франківська цей метод є основним для агентств нерухомості, які формують аналітику ринку на основі відкритих джерел OLX, Dom.rua, Lun.ua тощо. Проте точність таких оцінок значною мірою залежить від коректності та повноти вихідних даних.

У системі прогнозування реалізовані відомі ансамблеві методи машинного навчання Random Forest, Gradient Boosting і XGBoost, дві моделі нейронний мереж на основі багат шарового перцептрона MLPRegressor, а також розроблена комбінована модель. Це дає можливість визначити найбільш ефективні моделі для прогнозування вартості житла в Івано-Франківській області.

Запропонована комбінована модель прогнозування ціни житлової нерухомості RFGB, у якій застосовуються послідовно модель Random Forest і модель Gradient Boosting (або XGBoost). Така комбінація забезпечує підвищення точності прогнозу порівняно з використанням окремих моделей.

Кожна із моделей навчається на наборі даних, отриманих в результаті передобробки у попередніх модулях програмної системи, та формує прогнозовані значення ціни об'єкта житлової нерухомості на основі множини ознак. На етапі моделювання застосовується алгоритм регресії [6, с.872], який дозволяє відтворити залежність ринкової ціни житла від його характеристик.

Модуль візуалізації системи забезпечує графічну інтерпретацію результатів аналізу. Крім числового прогнозу система візуалізує графіки розподілу цін, кореляційні матриці, порівняння точності моделей, порівнює реальні й прогнозовані ціни, що підвищує інформативність системи.

Веб-інтерфейс програмної системи реалізовано на базі HTML та CSS, забезпечено кросбраузерну сумісність та адаптивність до різних типів пристроїв. На рисунку 2 представлено інтерфейс системи для введення параметрів житлового об'єкта.

Інтерфейс системи забезпечує збір всіх параметрів, які впливають на ціноутворення, включаючи тип ринку (первинний, вторинний), площу, кількість кімнат, локацію, поверх, та ін. для прогнозування вартості житла. Введені дані передаються на сервер через POST-запит, після чого система відображає розраховану прогнозовану ринкову ціну об'єкта в доларах США.

Під час розроблення системи прогнозування цін на житлову нерухомість було обрано низку технологій та бібліотек, які забезпечують масштабованість і ефективність реалізації всіх етапів – від збору даних до моделювання та візуалізації результатів. Програмна реалізація системи базується на основній мові програмування системи Python 3.11 [13], використовуючи asuncio та httpx для асинхронного веб-скрапінгу, а також BeautifulSoup4 для парсингу даних HTML-документів. Зберігання гетерогенних об'єктів нерухомості реалізовано у NoSQL-базі MongoDB за допомогою драйвера

Рис. 2. Інтерфейс системи прогнозування

Motor, аналітика та машинне навчання забезпечуються бібліотеками Pandas, NumPy та Scikit-learn. Завдяки такому комплексу програмного забезпечення вдалося реалізувати асинхронний збір даних, ефективне зберігання та передобробку, навчання моделей і представлення результатів користувачу у веб-інтерфейсі.

Після навчання моделі машинного навчання здійснено оцінки її точності за допомогою відповідних метрик оцінювання. Ці метрики кількісно визначають, наскільки добре модель прогнозує фактичні значення на основі вхідних даних. У контексті задач регресії, таких як прогнозування цін на нерухомість, використовуються метрики: середньоквадратична помилка MSE [14, с.813] і коефіцієнт детермінації R^2 [14, с.813], який характеризує частку варіації цільової змінної.

Середньоквадратична помилка (MSE) обчислюється за формулою:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{\text{fact},i} - P_{\text{pr}}(x_i))^2$$

де n – кількість об'єктів у вибірці, $P_{\text{fact},i}$ описує фактичну ринкову вартість i -го об'єкта, $P_{\text{pr}}(x_i)$ – прогноз моделі для вектора ознак (x_i) .

Коефіцієнт детермінації R^2 характеризує варіацію цільової змінної:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_{\text{fact},i} - P_{\text{pr}}(x_i))^2}{\sum_{i=1}^n (P_{\text{fact},i} - \bar{P}_{\text{fact}})^2},$$

де $\bar{P}_{\text{fact}}$ – середнє значення фактичної вартості нерухомості у вибірці.

Значення R^2 , що наближаються до одиниці, свідчать про високу якість моделі, оскільки в такому випадку більша частина варіації фактичних значень пояснюється побудованим прогнозом. Значення, близькі до нуля, вказують на статистичну неефективність моделі, за якої її прогнози близькі за значенням до середнього арифметичного $\bar{P}_{\text{fact}}$ значення вибірки.

Результати експериментальної оцінки підтвердили ефективність комбінованого використання моделей машинного навчання. Отримані значення MSE та коефіцієнта детермінації продемонстрували, що побудована комбінована модель забезпечує найвищу точність серед усіх протестованих методів і ефективно узагальнює закономірності ринку житлової нерухомості Івано-Франківської області. Результати порівняння точності моделей прогнозування подано у таблиці 1. Для оцінювання були використані середньоквадратична помилка MSE та коефіцієнт детермінації R^2 , що дає можливість комплексно оцінити точність прогнозу моделей.

Таблиця 1

Порівняння точності моделей прогнозування вартості житла

Модель прогнозування	MSE (scaled)	R^2
Random Forest	0.3125	0.701
Gradient Boosting	0.2410	0.762
RFGB	0.2054	0.790
MLPRegressor1	0.3812	0.640
MLPRegressor2	0.4175	0.695

Результати таблиці демонструють, що модель Random Forest забезпечила високу якість прогнозування та продемонструвала стійкість до шуму й локальних викидів. Водночас використання моделі Gradient Boosting надає кращі показники, що свідчить про його здатність поетапно зменшувати помилки та враховувати нелінійні закономірності ринку нерухомості.

Оцінювання нейронних мереж продемонструвало залежність точності від глибини архітек-

тури. Версія MLPRegressor1 (модель 1) з більшою кількістю шарів, продемонструвала вищу точність прогнозу порівняно із MLPRegressor2 (модель 2), що вказує на здатність моделі відтворювати складні взаємозв'язки між ознаками, хоча її результати поступилися ансамблевим алгоритмам. Комбінована модель RFGB забезпечила найменші значення MSE. Комбінування високої стійкості Random Forest з можливістю Gradient Boosting коригувати залишки дозволило досягти найкращих показників точності серед порівнюваних моделей. Завдяки врахуванню просторової неоднорідності даних та компенсації систематичних похибок базового алгоритму, такий метод забезпечує вищу точність прогнозів.

При розробці інформаційних систем ціна об'єкта житлової нерухомості моделюється за допомогою функції ціноутворення, основна ідея якої полягає в тому, що вартість активу є сумою вартостей його окремих характеристик.

Відома регресійна модель [6, с.872] задається виразом:

$$P_{\text{pr}} = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot x_i + \varepsilon,$$

де P_{pr} – прогнозована ціна об'єкта; β_0 – вільний член (базова константа ринку, що відображає мінімальну вартість входу); x_i – вектор характеристик об'єкта (площа, район, стан тощо); β_i – коефіцієнти вагомості, які визначають вплив кожної характеристики на ціну; ε – випадкова похибка, невраховані фактори.

Врахування ситуації ризику S у побудованій моделі (1) вводиться за допомогою коефіцієнта ризику та ринкової невизначеності. Коефіцієнт ризику та ринкової невизначеності R – це числовий показник, який коригує прогнозований системою результат, враховуючи фактори, які математична модель не може передбачити з наперед заданою точністю. Він включає складову ризику і складову невизначеності.

Складову ризику – це ймовірність того, що реальна ціна угоди відхилиться від розрахункової. Дана складова включає похибку моделі (якщо точність системи становить 5%, то ризик включає це відхилення) і ризик того, що об'єкт не вдасться продати за прогнозованою ціною у бажані терміни.

Складову невизначеності вводиться з метою передбачити вплив факторів, які важко або неможливо структурувати і виміряти чисельно: форс-мажори, різкі зміни в законодавстві, податках або військово-політичній ситуації, раптовий

ажіотаж на ринку, що не піддається логіці попередніх періодів, приховані дефекти об'єкта або особливі умови продавця/покупця. У моделі R враховується як коефіцієнт, що коригує прогнозу вартість залежно від ринкових умов: при стабільності він наближається до одиниці $R=1$, підтверджуючи прогнозоване значення, а в умовах нестабільності або кризи – зменшується до $R<1$, і призводить до зниження очікувань $D = R * P_{pr}$.

Наприклад, якщо прогнозоване значення P_{pr} і $R=0.9$, то очікувана ціна становитиме $D = 0.9 * P_{pr}$. Введення коефіцієнта ризику та ринкової невизначеності R , забезпечує динамічність і адаптивність моделі до невизначених факторів ринку нерухомості.

Етап 3. Аналіз відхилень. Важливим етапом моделювання прийняття рішень щодо вартості нерухомості є аналіз залишкових величин, спрямований на ідентифікацію аномальних ринкових пропозицій. Цей етап дозволяє диференціювати об'єкти на недооцінені та переоцінені відносно їхньої розрахункової вартості.

З метою аналізу відхилень у моделі прийняття рішень використовується наступна методика.

1. Формалізація розрахунку різниці цін

Математичний апарат аналізу базується на визначенні різниці між фактичною вартістю пропозиції P_{fact} та прогнозованою ціною P_{pr} , яка згерована моделлю машинного навчання

$$\Delta = P_{fact} - P_{pr}.$$

Від'ємне значення $\Delta < 0$ свідчить про недооцінку активу. Ринкова вартість об'єкта нижча за його теоретичну ціну, що класифікує його як потенційно привабливий інвестиційний інструмент. Додатне значення $\Delta > 0$ вказує на переоцінку об'єкта, і запитувана ціна перевищує середньоринковий еквівалент для аналогічних параметрів.

2. Верифікація через довірчий інтервал.

Для мінімізації впливу статистичної похибки моделі встановлюється довірчий інтервал, що становить $\pm 5-10\%$ від прогнозованого значення. Знаходження ціни в межах інтервалу інтерпретується як ринкова рівновага. Значення показника за межами інтервалу потребує додаткового експертного аналізу для верифікації причин відхилення.

3. Типологія та інтерпретація відхилень.

Аналіз відхилень дозволяє висунути гіпотези щодо факторів, які вплинули на ціноутворення: навмисне завищення вартості, наявність неявних якісних характеристик, необхідність термінового продажу.

– Навмисне завищення вартості для тестування попиту, що у контексті нерухомості означає стратегію виставлення об'єкта на ринок за спеці-

ально завищеною або непідтвердженою аналітичною ціною з метою визначення реальної готовності покупців платити за нього.

– Наявність неявних неформалізованих якісних характеристик: ексклюзивні переваги (дизайнерські рішення, локаційні переваги), не враховані у базовому наборі ознак моделі.

– Необхідність термінового продажу: значне від'ємне відхилення часто пов'язане з необхідністю швидкого продажу об'єкта або наявністю обтяжень (юридичних чи технічних ризиків).

Етап 4. Формування стратегії. Прийняття рішення про купівлю або продаж на основі отриманих прогнозів. Величина відхилення порівнюється із заданим порогом $\pm 5 \pm 10\%$:

1. Якщо відхилення менше -10% , висновок: "Об'єкт недооцінений".

Рекомендація покупцю: можливий прихований дефект або терміновий продаж, або юридичні проблеми з документами, або потреба у верифікації оголошення, можливе «фейкове оголошення» для залучення клієнтів.

Рекомендація продавцю: варто підвищити ціну до ринкового рівня. Якщо продаж терміновий – залишити ціну, але з розумінням фінансових втрат.

2. Відхилення від -10% до -5% .

Висновок для покупців: «Приваблива ціна», ціна нижча за ринкову, потребує швидкого реагування, але з перевіркою.

Висновок для продавців: «Помірна недооцінка», рекомендується використовувати цю стратегію для швидкого продажу без суттєвих втрат.

3. Якщо відхилення від -5% до $+5\%$, висновок: "Ціна ринкова".

Рекомендація покупцю: рекомендовано до розгляду.

Рекомендація продавцю: зберігати поточну вартість.

4. Від $+5\%$ до $+10\%$: висновок: «Помірна переоцінка», ціна вища за середню.

Рекомендація покупцю: обґрунтований торг.

Рекомендація продавцю: ціна виставлена «із запасом», закласти відхилення в суму торгу.

5. Якщо відхилення перевищує $+10\%$, висновок: "Об'єкт переоцінений". Покупцю рекомендовано торгуватися або не купляти. Продавцю рекомендовано знизити ціну.

Приклад аналізу інвестором або системою підтримки рішень конкретного об'єкта з використанням запропонованої моделі.

1. Вхідні дані об'єкта аналізу: 2-кімнатна квартира, 60 м², ЖК «Липки», Івано-Франківськ, фактична ціна пропозиції $P_{fact} = \$95000$ (ціна в оголошенні).

2. Розрахунок прогнозованої ціни P_{pr} .

Програмна система використовує навчену модель (наприклад, XGBoost), яка проаналізувала 5000 схожих угод при базовій ціні району \$1400/м² і розрахувала прогнозоване значення $P_{pr} = \$92000$.

3. Аналіз відхилення

$$\Delta = P_{\text{факт}} - P_{pr} = \$95000 - \$92000 = \$3000.$$

Відхилення у відсотках:
 $\$3000 / \$92000 * 100\% = +3,2\%$

4. Прийняття рішення. Результат порівнюється із заданим порогом відхилення $\pm 5\%$. У даному прикладі $+3,2\%$ потрапляє в категорію відхилення від -5% до $+5\%$, висновок "Ціна ринкова".

Висновок моделі: Ринкова пропозиція \$95000. Оцінка системи \$92000. Ціна об'єкта є адекватною. Відхилення у \$3000 може бути обумовлене суб'єктивними факторами, які модель не оцифрувала. Рекомендація: можна купляти, варто спробувати знизити ціну на \$2000–\$3000 під час переговорів.

Висновки. Розроблено модель прийняття рішень про ціну житлового нерухомого майна в умовах ризику, яка інтегрує і використовує програмну систему прогнозування цін житлової нерухомості. Програмна система автоматизовано здійснює збір і аналіз даних про подібні об'єкти житлової нерухомості та їх ціни на ринку Івано-Франківської області із відкритих джерел та прогнозує ціну визначеного об'єкта на основі алгоритмів машинного навчання та нейронних мереж. Модель прийняття рішень включає етапи аналізу варіантів, прогнозування ціни об'єкта житлової нерухомості, аналізу ризику та змін ціни внаслідок впливу невизначеного фактора, аналіз відхилень прогнозованої вартості від ринкової і формування рекомендацій щодо ціни купівлі чи продажу об'єкта. Прийняття рішень на основі розробленої моделі дозволяє покупцям, продавцям та інвесторам мінімізувати ризики та обґрунтовувати оцінки об'єктів житлової нерухомості.

Список літератури:

1. Пазинич В. І., Свистун Л. О. Оцінка об'єктів нерухомості: навч. посіб. Київ : Центр учбової літератури, 2021. 434 с.
2. Наумова О., Наумова М., Карпенко С. Ціноутворення на ринку нерухомості: аспект невизначеності. *Вчені записки Університету «КРОК»*. 2024. № 1 (73). С. 75–82. DOI: <https://doi.org/10.31732/2663-2209-2024-73-75-82>
3. Підсумки 2025 року для ринку нерухомості. ЛУН Статистика. 2025. URL: <https://lun.ua/stat/statistic-market-summary-0921> (дата звернення: 23.03.2026).
4. Ринок нерухомості Івано-Франківська: аналітика станом на липень 2025 року. ГІС «УБЕКОН». 2025. URL: <https://gisuvecon.com/main/118/rinok-neruhomosti-ivano-frankivska-analitika-stanom-na-lipen-2025-roku/> (дата звернення: 23.03.2026).
5. Автоматизована оцінка майна: від традицій до сучасності. ГІС «УБЕКОН». 2025. URL: <https://gisuvecon.com/main/51/avtomatizovana-ocinka-majna-vid-tradicij-do-suchasnosti/> (дата звернення: 23.03.2026).
6. Ouyang Xiaoyan. House Price Prediction Based on Machine Learning Models. *Highlights in Science, Engineering and Technology*. 2024. Vol. 85. P. 870–878. DOI: 10.54097/ftyf9665.
7. Мірошніченко І. В., Крашеніннікова О. В. Прогнозування ціни на нерухомість з використанням алгоритмів машинного навчання. *Ефективна економіка*. 2022. № 1. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=9890> (дата звернення: 25.03.2026). DOI: 10.32702/2307-2105-2022.1.81
8. Nimbalkar H., Patil N., Kathane T. Real estate price prediction using machine learning. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*. 2025. Vol. 7, Issue 10. P. 2138–2147.
9. Григорків В. С., Ярошенко О. І., Філіпчук Н. В. Нейронні мережі та їх використання для прогнозування тенденцій ринку нерухомості. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2012. Вип. 22.5. С. 324–330.
10. Воронін В. О., Мамчин М. М., Лянцє Е. В. Прогнозне моделювання тенденцій розвитку ринку нерухомості. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2012. № 735 : Логістика. С. 38–46.
11. Сорока Р. Прогнозування цін на житлову нерухомість Івано-Франківської області з використанням нейронних мереж. *Еврика – XXVI : збірник студентських наукових праць*. Івано-Франківськ : Прикарпат. нац. ун-т ім. В. Стефаника, 2025. С. 101–102.
12. Ndung'u R. Data Preparation for Machine Learning Modelling. *International Journal of Computer Applications Technology and Research*. 2022. Vol. 11. P. 231–235. DOI: 10.7753/IJCATR1106.1008.
13. Python Software Foundation. Python 3.11 Documentation: Data Science and Machine Learning Ecosystem. URL: <https://docs.python.org/3.11/> (дата звернення: 23.03.2026).
14. Li Z. A Comparative Study of Regression Models for Housing Price Prediction. *TCSISR*. 2024. Vol. 5. P. 810–816. DOI: 10.62051/qjs7y352.

Prevysokova N.V., Semankiv M.V., Izmailov A.V. DECISION-MAKING MODEL FOR RESIDENTIAL HOUSE PRICE BASED ON A SOFTWARE SYSTEM FOR DATA ANALYSIS AND PRICE PREDICTION

This article presents a scientifically grounded intellectual model for decision-making about the real estate house price in risk conditions. A key feature of the proposed approach is the integration of a specialized software system for house price prediction and data analysis residential property prices directly into the decision-making process. The developed software system implements a full data processing cycle: from the automated collection of semi-structured information about similar objects in the Ivano-Frankivsk region market from open sources, to the analysis of key characteristics that influence price, to the prediction of a forecast price for this object. Property value prediction is performed using machine learning algorithms, specifically the well-known ensemble methods Random Forest and Gradient Boosting, a method developed based on a combination of two ensemble methods (Random Forest and Gradient Boosting), and multi-layer neural network architectures. The proposed decision-making model is complicated and includes a series of sequential steps: identification and analysis of alternative real estate objects, prediction the house price, and analysis risks and potential value fluctuations under the influence of uncertainty factors. Attention is paid to analyzing deviations of predicted values from actual market prices, which allows for adaptation to data heterogeneity. Based on the results obtained, the model generates recommendations regarding the advisability of buying, selling, or investing, based on an objective assessment of market conditions. The implementation of the developed model and software tools allows real estate market participants, buyers, sellers, realtors, and investors, to significantly minimize financial risks associated with errors in subjective assessment. The scientific novelty of this work lies in the development of a system model that provides a decision-making support process in a volatile regional market.

Keywords: decision-making model, real estate price prediction, data analysis, linear regression, software implementation, Python, machine learning methods, neural network.

Дата першого надходження статті до видання: 26.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Пучков В.О.<https://orcid.org/0009-0004-2152-4353>

Національний університет «Одеська юридична академія»

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОГНОСТИЧНИХ AR-СИСТЕМ НА ОСНОВІ МУЛЬТИМОДАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

У статті розглянуто проблему розробки прогностичних систем доповненої реальності на основі мультимодального аналізу поведінкових даних користувача. Актуальність дослідження зумовлена зростанням ролі доповненої реальності у забезпеченні ефективної людино-машинної взаємодії та необхідністю переходу від реактивних до проактивних інтерфейсів. Використання мультимодальних інтерфейсів, що поєднують обробку жестів, мовних команд, рухів очей та тактильних сигналів, дозволяє підвищити точність, швидкість і природність взаємодії користувача з системою, а також зменшити когнітивне навантаження за рахунок використання природних каналів сприйняття та керування. У роботі запропоновано концепцію проактивної взаємодії, відповідно до якої система здатна прогнозувати дії користувача та адаптувати інтерфейс на основі аналізу мультимодальних даних, отриманих із різних сенсорних джерел. Розглянуто застосування методів машинного навчання та когнітивного моделювання для передбачення намірів користувача, що створює передумови для формування адаптивних та інтелектуальних AR-систем. Проведено огляд підходів, які демонструють ефективність використання мультимодальних інтерфейсів у прикладних сферах, зокрема в освіті, промисловості та робототехніці. Виконано аналіз обмежень сучасних AR-систем, серед яких виділено недостатній рівень інтеграції даних різних модальностей, обчислювальні обмеження при обробці великих обсягів даних у режимі реального часу, а також вузьку спеціалізацію існуючих алгоритмів. Визначено, що подолання цих обмежень потребує комплексного підходу до поєднання мультимодальних сигналів, когнітивних моделей та методів інтелектуальної обробки даних. Результати дослідження підтверджують доцільність подальшої розробки адаптивних прогностичних AR-систем, орієнтованих на персоналізацію взаємодії з користувачем та проактивну підтримку його дій у реальному часі.

Ключові слова: доповнена реальність, мультимодальна взаємодія, прогностичні системи, прогнозування, людино-машинна взаємодія, когнітивні моделі, машинне навчання, інтерактивні інтерфейси.

Постановка проблеми. Розвиток інформаційних технологій і мобільних платформ сприяв поширенню систем доповненої реальності (Augmented Reality, AR), що інтегрують віртуальні об'єкти у фізичне середовище в реальному часі та розширюють можливості взаємодії користувача. AR розглядається як напрям розвитку людино-машинної взаємодії (Human-Machine Interaction, HMI), оскільки забезпечує інтуїтивні інтерфейси, що поєднують реальний та віртуальний простір.

Еволюція AR-систем передбачає перехід до мультимодальних інтерфейсів, що використовують жести, голос, рухи очей і тактильні сигнали, підвищуючи природність взаємодії та знижуючи когнітивне навантаження. Активно розробляються архітектури AR-систем із сенсорними пристроями, алгоритмами обробки сигналів та інтеграцією даних із різних джерел, що дозволяє створювати інтерактивні інформаційні серед-

овища для освіти, промисловості, медицини та робототехніки.

Перспективним є використання штучного інтелекту для аналізу поведінки користувача та створення адаптивних систем, здатних прогнозувати дії та наміри на основі мультимодальних даних. Незважаючи на прогрес, більшість AR-систем залишаються реактивними і не враховують динамічні наміри користувача, що обмежує ефективність взаємодії.

Незважаючи на значний прогрес у дослідженнях доповненої реальності та мультимодальних інтерфейсів, більшість наявних AR-систем реалізують переважно реактивні моделі взаємодії, реагуючи на команди користувача пост-фактум. Питання аналізу мультимодальних даних для прогнозування намірів та побудови проактивних інтерфейсів, здатних адаптуватися до поведінки користувача, залишаються недостатньо дослі-

дженими. Існує потреба в розробці узагальнених архітектурних моделей та методів обробки мультимодальних даних, які б дозволили поєднувати інформацію з різних каналів для прогнозування дій користувача.

Таким чином, виникає суперечність між зростаючими вимогами до ефективності, інтуїтивності та адаптивності людино-машинної взаємодії в AR-середовищах, з одного боку, та обмеженістю реактивних AR-систем, які не здатні адаптуватися до динамічних намірів користувача на основі мультимодального аналізу, з іншого. Це зумовлює актуальність наукового завдання з дослідження та розробки підходів до створення прогностичних систем доповненої реальності, що базуються на мультимодальному аналізі поведінки користувача. Розв'язання цієї проблеми дозволить підвищити ефективність НМІ у середовищах доповненої реальності та мінімізувати когнітивне навантаження на користувача під час виконання завдань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ключовою особливістю AR-систем є поєднання фізичного та віртуального простору, що дозволяє користувачеві сприймати цифрову інформацію безпосередньо в контексті навколишнього середовища [12]. У межах цього дослідження під системою доповненої реальності розумітимемо апаратно-програмний комплекс, який забезпечує суміщення в реальному часі віртуальних об'єктів з фізичним оточенням користувача з метою розширення інформаційного контексту та підтримки виконання прикладних завдань.

Однією з визначальних характеристик сучасних AR-систем є орієнтація на природні способи взаємодії [3-5]. Традиційні графічні інтерфейси на основі клавіатури та маніпулятора типу «миша» виявляються неефективними в тривимірних інтерактивних середовищах, що стимулювало розвиток мультимодальних підходів до організації НМІ [10]. Мультимодальна взаємодія визначається як використання двох або більше каналів (модальностей) введення інформації для передачі команд та даних від користувача до системи. До основних модальностей, що застосовуються в AR, належать: жести, що розпізнавані за допомогою комп'ютерного зору або сенсорів, голосові команди, відстеження руху очей, тактильні сигнали, а також дані з різноманітних сенсорів [3].

Мультимодальний аналіз ґрунтується на інтеграції даних, отриманих з цих різноманітних джерел, з метою інтерпретації дій, контексту та намірів користувача. Цей процес передбачає розв'язання низки складних завдань:

1. синхронізація потоків даних, тобто узгодження в часі інформації, що надходить з різною частотою від різних сенсорів [2];

2. розробка методів комбінування різноманітних сигналів для формування цілісної інформаційної моделі поточного стану взаємодії [4];

3. обробка неповних, суперечливих або зашумлених даних, що є неминучим у реальних умовах;

4. врахування семантики середовища та поточного завдання для коректного розуміння значення мультимодальних сигналів [12].

Подальший розвиток AR-технологій нерозривно пов'язаний із використанням методів штучного інтелекту. Сучасні алгоритми машинного навчання, зокрема глибинні нейронні мережі, відкривають можливості для ефективної обробки великих обсягів мультимодальних даних та виявлення прихованих закономірностей у поведінці користувачів [6-9]. Це створює підґрунтя для переходу від реактивних систем до інтелектуальних адаптивних інтерфейсів. У таких системах вирішальну роль відіграють моделі класифікації та прогнозування, які дозволяють не лише ідентифікувати поточні дії, але й передбачати подальші наміри користувача [13], реалізуючи концепцію прогностичної взаємодії.

Прогностична взаємодія передбачає створення інформаційних систем, здатних на основі аналізу поведінки користувача та контексту середовища проактивно формувати рекомендації, адаптувати інтерфейс або виконувати підготовчі дії ще до моменту явного формулювання запиту [7]. Реалізація такого підходу вимагає подолання зазначених вище викликів мультимодального аналізу та інтеграції його результатів у моделі прийняття рішень, що функціонують у масштабі реального часу [8-9].

Постановка завдання. Метою дослідження є проведення літературного огляду наявних наукових праць, присвячених мультимодальним AR-системам, включно з методами інтерактивної взаємодії користувача через голос, жести та інші сенсорні канали, а також підходами до прогнозування поведінки користувача. На основі аналізу досліджень здійснюється формулювання наукової проблеми дисертаційного дослідження з обґрунтуванням його актуальності, визначенням прогалів у сучасній науковій літературі та постановкою компонентів подальшого дослідження у сфері інтеграції мультимодальних інтерфейсів в AR-системи.

Виклад основного матеріалу. Мультимодальні техніки AR-систем. Мультимодальна

взаємодія є одним із ключових напрямів еволюції сучасних AR-систем, оскільки вона дозволяє користувачеві одночасно використовувати кілька природних каналів комунікації. Фундаментальне значення цього підходу підтверджується дослідженням Сіті С. М. Нізам та співавт. [1], які демонструють, що мультимодальні інтерфейси суттєво перевершують одноmodalьні за точністю виконання завдань та суб'єктивним задоволенням користувачів. Автори пропонують класифікацію основних модальностей та наголошують, що їх синергійне поєднання дозволяє створювати більш інтуїтивні та природні способи маніпулювання віртуальними об'єктами.

У роботі Джу Чан Кім та співавт. [2] досліджуються архітектурні аспекти побудови мультимодальних AR-систем, інтегрованих з екосистемою Інтернету речей (IoT). Автори виділяють типовий набір модальностей, що включає відстеження погляду, розпізнавання жестів та голосу, а також дані з IoT-сенсорів. Для ефективного функціонування таких гетерогенних систем вкрай необхідні стандартизовані методи синхронізації та інтеграції даних, які наразі перебувають на стадії активних досліджень.

Емпіричні підтвердження ефективності мультимодальності наведено в роботі Чжимін Ван та співавт. [3]. Результати їхніх експериментів свідчать, що комбінування модальностей не лише підвищує загальну продуктивність користувача, але й дозволяє скоротити час виконання типових завдань у віртуальному середовищі. Сяоян Чжоу та співавт. [4] дослідили специфіку взаємодії у складних багатопредметних AR-сценах та показали, що інтеграція жестів і мовленнєвих команд є ефективною в умовах високої когнітивної навантаженості, забезпечуючи точніше та швидше виконання завдань.

Важливу роль у становленні цього наукового напрямку відіграли класичні роботи, зокрема дослідження Сільвії Іраваті та співавторів [5]. Їхні експерименти підтвердили фундаментальну перевагу мультимодальних підходів: поєднання жестів та голосових команд суттєво покращує ефективність взаємодії порівняно з традиційними методами управління.

Можна констатувати, що мультимодальний підхід є загальновизнаним стандартом для побудови сучасних людино-машинних інтерфейсів у доповненій реальності. Водночас, ці роботи зосереджені переважно на реактивній парадигмі взаємодії, тобто на інтерпретації вже виконаних користувачем дій. Питання використання багатих

мультимодальних потоків даних для прогнозування ще не виконаних дій та прихованих намірів користувача залишається відкритим і потребує окремого дослідження.

Прогностичні AR-помічники. Прогностична взаємодія в AR-системах спрямована на передбачення дій користувача до моменту їх явного виконання, що дозволяє підвищити ефективність, швидкість та інтуїтивність роботи з цифровим середовищем. У роботі Рагху Пара [6] досліджується інтеграція мультимодальних сигналів (голосу, жестів і відстеження погляду) для моделювання намірів користувача в AR-середовищах електронної комерції. Запропонована система здатна аналізувати поведінку покупця та на основі виявлених патернів надавати персоналізовані рекомендації, адаптуючи віртуальне оточення під індивідуальні потреби. Робота демонструє потенціал мультимодального аналізу для створення адаптивних інтерфейсів.

Більш узагальнений підхід запропоновано в дослідженні Юань Сю та співавт. [7], де представлено ієрархічну модель прогнозування майбутньої поведінки користувача. Модель базується на аналізі траєкторій погляду та семантичного контексту сцени, що дозволяє AR-системі передбачати дії користувача у віртуальних тренажерах та навчальних комплексах. Автори демонструють, що врахування контексту суттєво підвищує точність прогнозування порівняно з аналізом лише ізольованих поведінкових актів.

Перспективний напрям становить використання когнітивних моделей типу Belief-Desire-Intention (BDI) для створення прогностичних AR-помічників. BDI-модель, що запозичена з теорії агентів та філософії дії, описує раціонального агента через три компоненти: переконання, бажання та наміри. Внесок у розвиток цього підходу зробили Чень Лі та співавт. [8], представивши систему Satori – проактивного AR-асистента, здатного аналізувати наміри користувача та пропонувати релевантні дії або контент на основі моделювання його переконань, бажань і намірів у реальному часі. Автори демонструють, що BDI-підхід дозволяє системі не просто реагувати на команди, а проактивно передбачати потреби користувача.

Розвиток цієї ідеї представлено в роботі Салми Нурунніса [9], де BDI-модель застосовується для покращення співпраці між людиною та інтелектуальними агентами в AR-середовищах. Авторка підкреслює, що моделювання намірів та бажань користувача дозволяє агентам передбачати його

поведінку і діяти проактивно, суттєво зменшуючи затримки у взаємодії та підвищуючи загальну інтуїтивність системи. Увага приділяється механізмам адаптації моделі до змін у поведінці та цілях користувача.

Розглянуті дослідження закладають теоретичні та практичні основи для створення прогностичних AR-систем. Вони демонструють, що мультимодальні дані є інформативним джерелом для виявлення намірів користувача. Когнітивні моделі пропонують концептуально потужний апарат для формалізації та прогнозування поведінки.

Однак, аналіз цих робіт виявляє низку невирішених проблем, які стримують практичне впровадження прогностичних AR-систем, та визначають сутність наукової проблеми, зокрема відсутність узагальнених методів інтеграції мультимодальних потоків даних із високорівневими когнітивними моделями типу BDI.

Архітектурні підходи до організації AR-систем. Ефективність користувацького досвіду в системах доповненої реальності критично залежить від архітектурної організації, яка забезпечує узгоджену обробку сенсорних даних, синхронізацію віртуального та реального простору, а також реалізацію інтерактивних сценаріїв у реальному часі. Як зазначають Теофілос Пападопулос та співавт. [10], AR-системи мають забезпечувати безшовну інтеграцію різноманітних методів взаємодії, що висуває підвищені вимоги до модульності, масштабованості та продуктивності програмно-апаратних рішень. Автори підкреслюють, що ключовим викликом залишається узгодження різноманітних сенсорних потоків та створення адаптивних інтерфейсів, здатних підлаштовуватися під індивідуальні особливості користувача та контекст середовища.

Специфіку архітектурних рішень для окремих прикладних областей розкрито в роботі Рьо Судзукі та співавт. [11], які досліджують застосування AR у робототехніці. Автори пропонують класифікацію архітектурних підходів до інтеграції мультимодальних інтерфейсів у системи людино-роботизованої взаємодії. Дослідження демонструє, що адаптивні архітектури, здатні враховувати як дії оператора, так і стан роботизованих систем, підвищують ефективність управління складними технічними комплексами. Особлива увага приділяється питанням синхронізації даних між різноманітними сенсорами та забезпеченню детермінованих затримок, критичних для безпеки в людино-машинних системах.

Ще одним з напрямів архітектурних досліджень є контекстно-орієнтовані AR-системи.

Томі Тахара та співавт. [12] пропонують підхід Retargetable AR, який використовує тривимірні графі для моделювання семантичних зв'язків між об'єктами в реальному середовищі. Така архітектура дозволяє системі не лише відстежувати просторове розташування об'єктів, але й розуміти їх функціональне призначення та взаємозв'язки, що є критичним для коректної інтерпретації дій користувача.

У своєму дослідженні Євгеній Канарський та співавт. [13] розглядають застосування марківських моделей для моделювання поведінки оператора в AR-середовищі, призначеному для моніторингу небезпечних зон за допомогою безпілотних літальних та наземних апаратів. Запропонований підхід демонструє, як статистичні моделі можуть бути інтегровані в архітектуру AR-системи для прогнозування наступних дій оператора на основі аналізу послідовностей його попередніх дій.

Аналіз архітектурних підходів свідчить про поступову еволюцію AR-систем від простих візуалізаторів до інтелектуальних середовищ, здатних враховувати контекст та семантику взаємодії. Водночас, наявні рішення є вузькоспеціалізованими та використовують обмежений набір вхідних даних.

Мультимодальні AR-системи в промисловості. Ольга Павлова та співавт. [14] досліджують інформаційні технології візуалізації 3D-моделей об'єктів на основі доповненої реальності, демонструючи, що накладання віртуальних інструкцій та схем безпосередньо на реальне обладнання сприяє більш точному та швидкому виконанню технологічних операцій, а також суттєво зменшує кількість помилок при взаємодії з технікою.

Валерій Капустник та співавт. [15] аналізують вплив технологій доповненої реальності на ефективність праці та психологічний стан працівників. Автори підкреслюють, що застосування AR може підвищувати продуктивність виконання завдань та покращувати сприйняття інформації, однак це потребує ретельного врахування ергономічних аспектів та індивідуальних особливостей користувачів при проектуванні інтерфейсів.

Дослідження демонструють ефективність застосування AR-технологій у промисловості, підтверджуючи їх здатність покращувати візуалізацію, підвищувати інтерактивність та персоналізувати виробничий досвід. Водночас, в промислових AR-системах проактивна підтримка користувачів залишається нереалізованою.

Висновки. На основі аналізу публікацій виконана постановка наукової проблеми дисертацій-

ного дослідження, яка полягає в необхідності розробки теоретичних засад, методів та засобів побудови прогностичних AR-систем, здатних на основі комплексного аналізу мультимодальних даних про поведінку користувача передбачати його наміри та проактивно адаптувати віртуальне середовище в реальному часі. Розв'язання цієї проблеми потребує подолання зазначених вище суперечностей між наявним теоретичним та практичним доробком та відсутністю цілісних методологічних та архітектурних рішень.

Відповідно до сформульованої проблеми визначено основні компоненти дисертаційного дослідження.

Об'єктом дослідження є процес людино-машинної взаємодії в середовищах доповненої реальності на основі мультимодальних даних. Предметом дисертаційного дослідження є моделі, методи та засоби прогнозування намірів користувача в системах доповненої реальності на основі мультимодального аналізу поведінкових даних.

Метою дисертаційного дослідження є підвищення ефективності людино-машинної взаємодії в середовищах доповненої реальності шляхом розробки моделей та методів прогностичного аналізу мультимодальних даних для проактивної адаптації інтерфейсу.

Список літератури:

1. Nizam S. M., Abidin R. Z., Hashim N. C., Lam M. C., Arshad H., Majid N. A. A. A review of multimodal interaction technique in augmented reality environment. *International Journal of Advanced Science, Engineering and Information Technology*. 2018. Vol. 8, No. 4-2. P. 1460. DOI: 10.18517/ijaseit.8.4-2.6824.
2. Kim J. C., Laine T. H., Åhlund C. Multimodal interaction systems based on internet of things and augmented reality: a systematic literature review. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, No. 4. Art. 1738. DOI: 10.3390/app11041738.
3. Wang Z., et al. Comparing single-modal and multimodal interaction in an augmented reality system. *Proceedings of the 2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)*. 2020. DOI: 10.1109/ISMAR-Adjunct51615.2020.00052.
4. Zhou X., Williams A. S., Ortega F. R. Eliciting multimodal gesture + speech interactions in a multi-object augmented reality environment. *Proceedings of the 28th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*. 2022. P. 1-10. DOI: 10.1145/3562939.3565637.
5. Irawati S., et al. An evaluation of an augmented reality multimodal interface using speech and paddle gestures. *Proceedings of the International Conference on Artificial Reality and Telexistence*. Springer Berlin Heidelberg, 2006. P. 272-283. DOI: 10.1007/11941354_28.
6. Para R. K. Intent prediction in AR shopping experiences using multimodal interactions of voice, gesture, and eye tracking: a machine learning perspective. *Journal of Artificial Intelligence General Science (JAIGS)*. 2024. Vol. 7, No. 1. P. 52-62. DOI: 10.60087.
7. Xu Y., et al. Seeing my future: predicting situated interaction behavior in virtual reality. *arXiv preprint*. 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2510.10742.
8. Li C., et al. Satori: towards proactive AR assistant with belief-desire-intention user modelling. *Proceedings of the 2025 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2025. P. 1-24. DOI: 10.48550/arXiv.2410.16668.
9. Noorunnisa S. An extended belief-desire-intention model for human-agent collaboration : PhD thesis. CQUniversity, 2025.
10. Papadopoulos T., et al. Interactions in augmented and mixed reality: an overview. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, No. 18. Art. 8752. DOI: 10.3390/app11188752.
11. Suzuki R., et al. Augmented reality and robotics: a survey and taxonomy for AR-enhanced human-robot interaction and robotic interfaces. *Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2022. P. 1-33. DOI: 10.1145/3491102.3517719.
12. Tahara T., et al. Retargetable AR: context-aware augmented reality in indoor scenes based on 3D scene graph. *Proceedings of the 2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)*. 2020. P. 249-255. DOI: 10.48550/arXiv.2008.07817.
13. Kanarskyi Y., et al. Markov modelling of human-machine interaction in an augmented reality environment for UAV/UGV-based hazardous area monitoring systems. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2025. No. 4. P. 35-54. DOI: 10.32620/reks.2025.4.03.
14. Pavlova O., Bashta A., Kovtoniuk M. Augmented reality based information technology for objects 3D models visualization. *Computer systems and information technologies*. 2023. № 1. P. 68-74. DOI: <https://doi.org/10.31891/csit-2023-1-9>.
15. Капустник В. А., Стукалкіна Д. С., Завгородній І. В. Аналіз впливу доповненої реальності як прикладу цифровізації на ефективність праці та стан працівників. *Актуальні проблеми профілактичної медицини : зб. наук. пр.* Харків : ХНМУ, 2020. С. 61-63. URL: <https://repo.knmu.edu.ua/handle/123456789/26395>

Puchkov V.O. PROBLEM STATEMENT OF RESEARCH ON PREDICTIVE AR SYSTEMS BASED ON MULTIMODAL ANALYSIS

The article addresses the development of predictive augmented reality (AR) systems based on multimodal analysis of user behavioral data. The relevance of this research is driven by the growing role of AR in enabling effective human–machine interaction and the need to shift from reactive to proactive interfaces. The use of multimodal interfaces that integrate gesture recognition, voice commands, eye movements, and haptic signals allows for increased accuracy, speed, and naturalness of user interaction with the system, while also reducing cognitive load by leveraging natural perception and control channels. This work proposes a concept of proactive interaction, wherein the system can anticipate user actions and adapt the interface based on the analysis of multistream data obtained from various sensory sources. The application of machine learning methods and cognitive modeling for predicting user intentions is explored, creating the foundation for adaptive and intelligent AR systems. A review of approaches demonstrating the effectiveness of multimodal interfaces in applied domains, such as education, industry, and robotics, is also presented. The limitations of current AR systems are analyzed, highlighting insufficient integration of data from different modalities, computational constraints when processing large volumes of real-time data, and the narrow specialization of existing algorithms. It is concluded that overcoming these limitations requires a comprehensive approach combining multimodal signals, cognitive models, and intelligent data processing methods. The results of the study confirm the feasibility of further developing adaptive predictive AR systems aimed at personalizing user interaction and proactively supporting user actions in real time.

Keywords: *augmented reality, multimodal interaction, predictive systems, prediction, human–machine interaction, cognitive models, machine learning, interactive interfaces.*

Дата першого надходження статті до видання: 25.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Романенко О.О.<https://orcid.org/0009-0008-9316-1941>

Криворізький національний університет

Q-АНАЛІЗ СИСТЕМИ ПРОГНОЗНОГО ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

Сучасний етап розвитку промислового сектору характеризується все більшим ускладненням архітектури технологічного обладнання та інтенсифікацією виробничих процесів. За таких умов, забезпечення безперебійної експлуатації технічних систем вимагає переходу від традиційних стратегій планово-попереджувального обслуговування до концепції прогнозного технічного обслуговування (Predictive Maintenance). Ефективність таких систем ТО визначається не лише точністю аналітичних алгоритмів, а й структурною стійкістю інформаційних зв'язків між їх функціональними модулями. Наявність прихованих архітектурних вразливостей може призводити до розриву критичних зв'язків та інформаційної ізоляції сегментів системи, що нівелює коректність прогнозних моделей. Попри значну кількість розробок у сфері діагностичних алгоритмів, питання топологічної цілісності та багатовимірної зв'язності архітектур PdM-систем залишаються недостатньо дослідженими.

У роботі проведено дослідження структури системи прогнозного технічного обслуговування із застосуванням методології Q-аналізу, яка дозволяє формалізувати архітектуру у вигляді багатовимірного симпліціального комплексу, що дає можливість кількісно оцінити приховані рівні інформаційної зв'язності та виявити топологічні бар'єри. Здійснено оцінку структурної цілісності та надійності системи, представленої у джерелах. Встановлено, що така архітектура основана на послідовній топології передавання даних і є критично вразливою до відмов вузлів та має високий рівень топологічних перешкод. Доведено, що лінійність структури спричиняє ізоляцію функціональних модулів у разі втрати критичних зв'язків. Запропоновано вдосконалену функціональну схему з централізованим сховищем даних, що реалізує паралельний доступ до інформаційних ресурсів. Отримані результати підтверджують, що перехід до централізованої моделі збереження даних значно покращує топологічну цілісність системи прогнозного ТО. Застосування Q-аналізу дозволило об'єктивно верифікувати переваги запропонованої архітектури, що є критичним для забезпечення надійної роботи складного технологічного обладнання в межах концепції Predictive Maintenance.

Ключові слова: Q-аналіз, симплекс, симплекційний комплекс, технічне обслуговування, predictive maintenance, матриця інцидентності, структурний вектор, вектор перешкод.

Постановка проблеми. Розвиток промислового сектору як в Україні та і у світі характеризується ускладненням як обладнання, що використовується в технологічних процесах, так і самих технологічних процесів, тому актуальним є задача забезпечення безперебійної та надійної роботи технологічного обладнання. Традиційним інструментом підтримки працездатного стану обладнання впродовж його життєвого циклу є системи технічного обслуговування та ремонту. Провідним сучасним підходом є прогнозне технічне обслуговування (Predictive Maintenance), що використовує моніторинг стану агрегатів та аналіз даних для виявлення прихованих дефектів та прогнозування залишкового ресурсу ще до моменту настання пошкодження та виходу устаткування з ладу. Ефектив-

ність таких систем ТО напряму залежить від швидкості та надійності взаємодії їхніх функціональних модулів: від первинного збору даних з датчиків до роботи аналітичних алгоритмів прогнозування та модулів прийняття управлінських рішень.

Для створення надійної системи технічного обслуговування із прогнозуванням залишкового ресурсу обладнання важливими є не тільки алгоритми прогнозування та діагностики, а й сама структура системи, оскільки приховані архітектурні вразливості можуть бути причиною розриву критичних інформаційних зв'язків, що призводить до ізоляції окремих частин системи і робить неможливим прийняття адекватних рішень навіть за умови коректної роботи прогнозної частини системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В ході аналізу наукових досліджень та публікацій за темою [1-5], було встановлено, що фокус переважної більшості робіт спрямований на аналітичну та алгоритмічну частини прогнозного технічного обслуговування. Хоча в таких роботах і наводяться структурні схеми та пропонується варіанти конфігурації подібних систем, залишається осторонь дослідження інформаційних зв'язків у таких схемах.

Постановка завдання. Враховуючи визначену прогалину в наукових розробках, метою дослідження є аналіз архітектури системи прогнозного технічного обслуговування для оцінки показників її топологічної цілісності та багатовимірної зв'язності.

Виклад основного матеріалу. В якості інструменту дослідження було обрано Q-аналіз, так як дана методологія з її математичним апаратом дозволяє формалізувати систему у вигляді багатовимірного симпліціального комплексу та кількісно оцінити приховані рівні інформаційної зв'язності між вузлами та цілісність системи.

В якості базової структури системи прогнозного технічного обслуговування взято схему (рисунок 1) запропоновану в [1].

Розглядаючи схему, наведену на рисунку 1, функціональну структуру системи можна подати як взаємодію двох скінченних множин: множини функціональних блоків (множина L) та множини інформаційних потоків, що циркулюють між ними (множина F). На основі виділених множин F та L

формується матриця інцидентності Λ . Елемент матриці $\lambda_{ij}=1$, за умови, якщо функціональний блок L_i певним чином взаємодіє (генерує, використовує тощо) інформаційний потік F_j . У протилежному випадку $\lambda_{ij}=0$. Нижче наведена матриця інцидентності для системи,

$$\Lambda = \begin{bmatrix} & F_1 & F_2 & F_3 & F_4 & F_5 & F_6 & F_7 & F_8 & F_9 & F_{10} & F_{11} \\ L_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ L_2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ L_3 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ L_4 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ L_5 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ L_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ L_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Першочергово виконується розрахунок розмірності симплексів за формулою наведеною в [6]:

$$\dim(\sigma) = |\sigma| - 1 \quad (1)$$

Симплекси $\sigma(L_2)$, $\sigma(L_4)$, $\sigma(L_5)$ мають по 4 одиниці, отже їх розмірність $q = 3$. Аналогічно визначено розмірність для інших симплексів:

$$q=3; q_3=3 \{x_2, x_4, x_5\}$$

$$q=2; q_2=2 \{x_3, x_6\}$$

$$q=1; q_1=2 \{x_1, x_7\}$$

Максимальна розмірність комплексу $Q_{dimK}=3$ дорівнює трьом, тому $Q_{dimK}=3$. Показник Q_{dimK} визначає розмірність першого структурного вектора, для формування якого необхідно обчислити кількість зв'язних компонентів на кожному

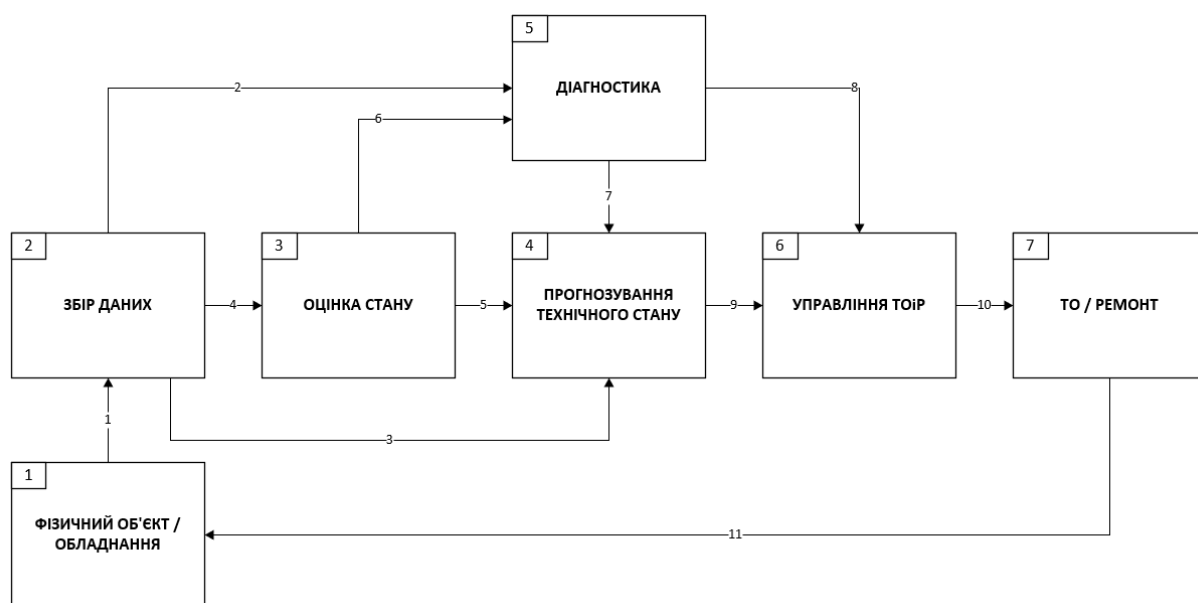


Рис. 1. Загальна функціональна схема прогностичного технічного обслуговування

наступному кроці зниження ієрархічного рівня системи. Нижче проведено розрахунок рівнів q -зв'язності для даної системи:

$$\begin{aligned} q=3; q_3=3 & \{x_2\}, \{x_4\}, \{x_5\} \\ q=2; q_2=5 & \{x_2\}, \{x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\} \\ q=1; q_1=7 & \{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}, \{x_7\} \\ q=0; q_0=1 & \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7\} \end{aligned}$$

Перший структурний вектор комплексу Q_K , відповідно до [7] знаходиться за формулою:

$$Q_K = (Q_n, Q_{n-1}, \dots, Q_1, Q_0), \quad (2)$$

де $Q_n = Q_{dimK}$

Раніше було встановлено, що $Q_{dimK} = 3$, отже $Q_K = \{Q_3, Q_2, Q_1, Q_0\}$. Підставляючи значення у формулу отримуємо:

$$Q_K = \{3, 5, 7, 1\}$$

Спираючись на отримані значення першого структурного вектора, перейдемо до визначення вектора перешкод D , який слугує математичним індикатором наявності топологічних перепон у структурі зв'язків на кожному рівні розмірності. Відповідно до [8] вектор перешкод D визначається як:

$$D = \{Q_K - I\}, \quad (3)$$

де I – одиничний вектор

$$D = ((3-1), (5-1), (7-1), (1-1)) = (2, 4, 6, 0)$$

Таким чином, визначено, що симпліціальний комплекс є зв'язним лише на нульовому рівні розмірності $q_0=1$. Для проміжних та великих значень зв'язності ($q=1, 2, 3$) комплекс розпадається на 7, 5 та 3 незв'язних компоненти відповідно. Вектор перешкод D свідчить про те, що багатоканальний обмін даними в системі, з наведеною на рисунку 1 архітектурою, ускладнений, оскільки перешкода дорівнює нулю лише на найнижчому рівні зв'язності. Така архітектура системи має строгий послідовний характер інформаційних потоків між блоками.

Також, встановлено, що блоки 2, 4, 5 («Збір даних», «Прогнозування», «Діагностика») мають максимальну розмірність у системі ($q = 3$). Кожен із них оперує 4 інформаційними потоками (зв'язками), що робить їх геометрично найскладнішими елементами системи – 3-вимірними симплексами (тетраедрами). Оскільки загальний показник структурної надлишковості системи вкрай низький (на рівні 0-зв'язності), ці блоки виступають головними вузлами перетину. Спотворення даних у будь-якому з цих вузлів миттєво перериває передачу даних, що унемож-

ливає адекватне управління технічним обслуговуванням і призводить до відмови всієї системи.

За результатами проведеного аналізу встановлено, що існуюча структура системи прогнозного ТО має жорстку послідовну архітектуру, що робить її вразливою до зупинки всього процесу при відмові хоча б одного вузла. З огляду на це, виникає необхідність оптимізувати топологію системи, забезпечивши її відмовостійкість, паралельну обробку даних та високу структурну цілісність. Вирішення цієї задачі пропонується здійснити шляхом переходу від лінійної передачі інформації до архітектури на базі єдиного сховища даних.

Було розроблено функціонально-структурну схему системи прогнозного ТО, яка враховує всі, зазначені вище зауваження. Оновлена схема представлена на рисунку 2. Ключовою відмінністю оновленої схеми стало єдине сховище даних (Блок 8 «Збереження даних»), у якому акумулюється інформація від усіх блоків, які генерують ті чи інші дані. Окрім цього, до такого сховища мають доступ і інші блоки. Таким чином, стає можливим паралельний доступ до даних, що дозволяє уникати послідовних залежностей між вузлами системи та виключає ризик інформаційної ізоляції вузлів у разі локальних апаратних чи програмних збоїв.

Матриця інцидентності для оптимізованої функціональної схеми системи прогнозного технічного обслуговування (Λ_N) матиме наступний вигляд:

$$\Lambda_N = \begin{bmatrix} & y_1 & y_2 & y_3 & y_4 & y_5 & y_6 & y_7 & y_8 & y_9 \\ x_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ x_2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ x_3 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ x_4 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ x_5 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ x_6 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ x_7 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_8 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

На відміну від класичної теорії графів, де взаємодія між вершинами визначається наявністю прямого ребра (з'єднання) [9], апарат Q -аналізу має іншу природу зв'язності. У математичному апараті Q -аналізу зв'язок між симплексами, в даному випадку, між функціональними блоками, формується виключно на основі спільних вершин. З огляду на це, заповнення матриці значеннями «1» для симплексів, які на структурній схемі можуть не мати прямого послідовного з'єднання, що пояснюється тим, що блок 8 (Збереження даних) формує єдиний інформаційний простір,

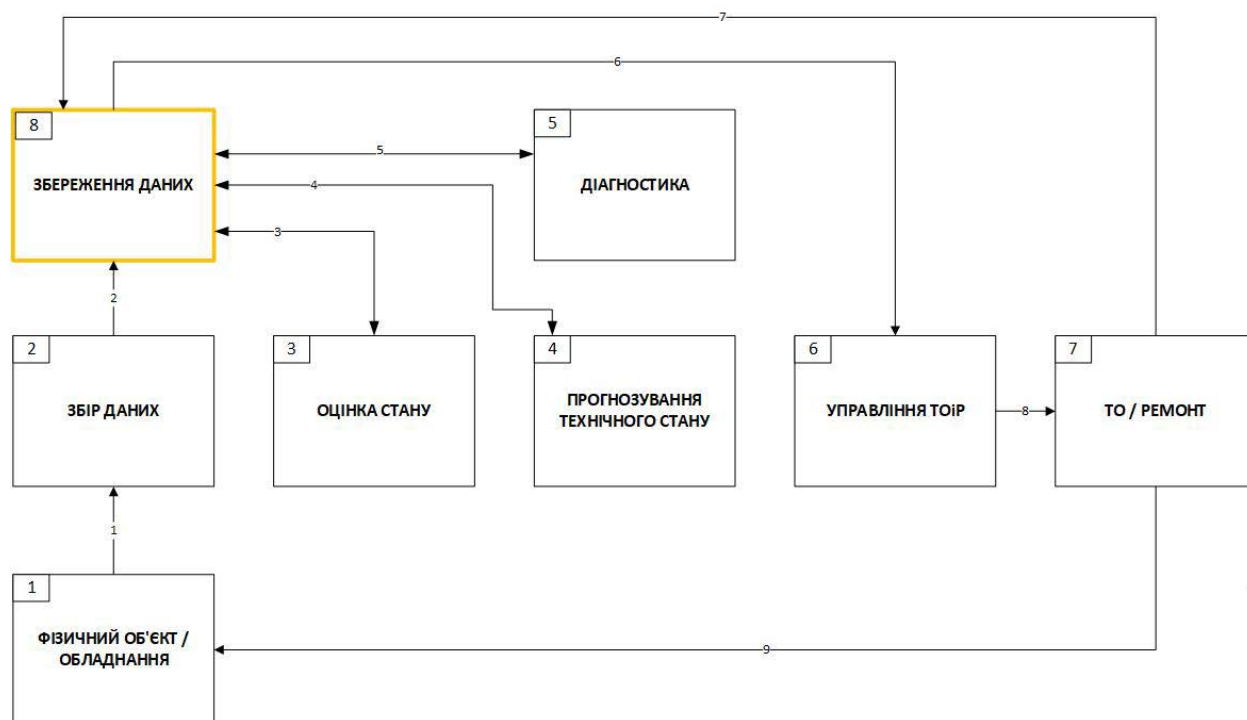


Рис. 2. Оновлена функціональна схема системи прогностного технічного обслуговування

а будь-який функціональний модуль (наприклад, блок оцінки стану, прогнозування чи діагностики), який має права доступу до цього сховища, автоматично отримує доступ до всього комплексу, агрегованих у ньому даних. Тобто симплекси отримують «1» у відповідних стовпцях не через наявність прямого зв'язку між собою, а через факт спільного доступу до банку інформації.

Максимальна розмірність комплексу в оновленій системі дорівнює визначається симплексом x_7 (блок «ТО / Ремонт») та дорівнює 7.

Визначення рівнів q-зв'язності для оновленої схеми:

$$q=7; q_7=1 \quad \{x_7\}$$

$$q=6; q_6=2 \quad \{x_7, x_6\}, \{x_2\}$$

$$q=5; q_5=1 \quad \{x_7, x_6, x_5, x_4, x_3, x_2\}$$

$$q=4; q_4=1 \quad \{x_8, x_7, x_6, x_5, x_4, x_3, x_2\}$$

$$q=3; q_3=1 \quad \{x_8, x_7, x_6, x_5, x_4, x_3, x_2\}$$

$$q=2; q_2=1 \quad \{x_8, x_7, x_6, x_5, x_4, x_3, x_2\}$$

$$q=1; q_1=2 \quad \{x_8, x_7, x_6, x_5, x_4, x_3, x_2\}, \{x_1\}$$

$$q=0; q_0=1 \quad \{x_8, x_7, x_6, x_5, x_4, x_3, x_2, x_1\}$$

Вектор $Q_N = \{1, 2, 1, 1, 1, 2, 1\}$ показує, що запропонована структура дозволяє уникнути виявленої раніше вразливості послідовних ланцюгів передавання. Утримання системою стану єдиної компоненти

зв'язності на чотирьох послідовних рівнях високої розмірності (від $q=5$ до $q=2$) свідчить про наявність структурної надлишковості. Це означає, що інформаційні потоки дублюються через спільний багатовимірний простір параметрів, гарантуючи, що вихід з ладу окремих каналів передачі даних не призведе до фрагментації системи чи зупинки процесу управління технічним обслуговуванням.

Для виявлення наявних топологічних бар'єрів або розривів, що заважають вільному розповсюдженню даних між функціональними блоками, виконаємо розрахунок вектора перешкод за формулою (3).

На основі отриманого раніше вектора Q_N , вектор перешкод для оптимізованої системи має вигляд:

$$D_N = \{0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0\}$$

Як видно, в оптимізованій структурі майже немає топологічних бар'єрів при обміні даними, що гарантує відсутність вузьких місць та забезпечує можливість паралельної роботи алгоритмів прогнозування і діагностики.

Висновки. У ході дослідження було проведено аналіз архітектури системи прогнозного технічного обслуговування за допомогою методології Q -аналізу, що дозволило кількісно оцінити її топологічну цілісність та рівні інформаційної зв'язності. Встановлено, що базова струк-

тура системи є топологічно вразливою та сильно фрагментованою, оскільки її структурна цілісність забезпечується лише на найнижчому рівні. Для усунення цієї вразливості запропоновано та обґрунтовано перехід до зв'язної топологічної моделі на базі єдиного багатовимірного сховища даних. За допомогою математичного апарату Q -аналізу доведено ефективність оптимізованої архітектури. Розрахунки показали, що в оптимізо-

ваній системі рівень зв'язності суттєво зріс – вона зберігає цілісність на чотирьох послідовних рівнях високої розмірності. Таким чином, використання Q -аналізу підтвердило, що створення архітектури з централізованим збереженням даних є критично важливим для забезпечення надійної та безперебійної роботи сучасного технологічного обладнання в рамках концепції Predictive Maintenance.

Список літератури:

1. "The Standardisation Roadmap of Predictive Maintenance for SinoGerman Industrie 4.0 / Intelligent Manufacturing," 2018.
2. van Dinter R., Tekinerdogan B., Catal C. Reference architecture for digital twin-based predictive maintenance systems. *Computers & Industrial Engineering*. 2023. P. 109099. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109099>
3. Maintenance 4.0: Intelligent and Predictive Maintenance System Architecture / A. Cachada et al. 2018 *IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Turin, 4–7 September 2018. URL: <https://doi.org/10.1109/etfa.2018.8502489>
4. Sang G. M., Xu L., de Vrieze P. A Predictive Maintenance Model for Flexible Manufacturing in the Context of Industry 4.0. *Frontiers in Big Data*. 2021. Vol. 4. URL: <https://doi.org/10.3389/fdata.2021.663466> (date of access: 25.03.2026).
5. Predictive Maintenance in Industry 4.0 / G. M. Sang et al. *ICIST'20: 10th International Conference on Information Systems and Technologies*, Lecce Italy. New York, NY, USA, 2020. URL: <https://doi.org/10.1145/3447568.3448537> (date of access: 25.03.2026).
6. Полуциганова В., Смирнов С. Методологія побудови основних метрик Q -аналізу та їх застосування. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2019. №3. URL: <https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2019.3.07>
7. Медведенко В., Смирнов С. Використання алгоритмів Q -аналізу на прикладі банківської системи. «Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики»: Матеріали XVI Всеукр. науково-практ. конференції студентів, аспірантів та молодих вчен., м. Київ, 26–27 квіт. 2018 р. Київ, 2018. С. 33–36.
8. Atkin R. H. Combinatorial Connectivities in Social Systems. – 1997. – 200 p
9. Темнікова О. Дискретна математика (Частина 1) : конспект лекцій. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 154 с.

Romanenko O.O. Q-ANALYSIS OF A PREDICTIVE MAINTENANCE SYSTEM

The current stage of development in the industrial sector is characterized by a significant and increasing complexity in the architecture of technological equipment and the intensification of production processes. Under these conditions, ensuring the uninterrupted operation of technical systems requires a transition from traditional planned preventive maintenance strategies to the concept of predictive maintenance (PdM).

The effectiveness of such maintenance systems is determined not only by the accuracy of prediction algorithms but also by the structural stability of the data links between their functional constituents. The presence of hidden architectural vulnerabilities may lead to the disruption of critical links and the information isolation of system segments, which negates the correctness of predictive models. Despite a significant number of developments in the field of diagnostic and prediction algorithms, the issues of topological integrity and multidimensional connectivity of PdM system architectures remain insufficiently studied.

In this work, a study of the structure of the predictive maintenance system was conducted using the Q -analysis methodology. This approach allows the formalization of the architecture in the form of a multidimensional simplicial complex, enabling the quantitative assessment of hidden levels of information connectivity and the identification of topological barriers.

An assessment of the structural integrity and reliability of the system presented in the literature was carried out. It was established that this architecture is based on a sequential data transmission topology and is critically vulnerable to node failures, exhibiting a high level of topological obstacles. It was proven that the linearity of the structure causes the isolation of functional modules in the event of the loss of critical links.

An improved functional scheme with a centralized data storage was proposed, which implements parallel access to information resources. The obtained results confirm that the transition to a centralized data storage model significantly improves the topological integrity of the predictive maintenance system.

The application of Q -analysis made it possible to objectively verify the advantages of the proposed architecture, which is critical for ensuring the reliable operation of complex technological equipment within the Predictive Maintenance concept.

Keywords: Q -analysis, Predictive Maintenance, simplex, simplicial complex, incidence matrix, structure vector, obstruction vector.

Дата першого надходження статті до видання: 16.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 09.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Рудь А.В.

<https://orcid.org/0000-0002-7206-7103>

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»

Рудь А.В.

<https://orcid.org/0000-0002-1714-2596>

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ АГРОМАШИНИ В СИСТЕМАХ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА: АВТОМАТИЗАЦІЯ, СЕНСОРНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ОПЕРАЦІЙ

Сучасний розвиток аграрного виробництва супроводжується активним упровадженням цифрових технологій, автоматизованих систем керування та сенсорного моніторингу виробничих процесів. За таких умов інтелектуальні агромашини стають ключовими елементами технологічної інфраструктури точного землеробства, забезпечуючи адаптацію польових операцій до просторової неоднорідності ґрунтів, кліматичних факторів і стану посівів. Метою дослідження є визначення особливостей застосування інтелектуальних агромашин у системах точного землеробства й обґрунтування напрямів підвищення ефективності агротехнологічних операцій на основі автоматизації, сенсорного моніторингу та цифрового управління виробничими процесами. У дослідженні використано методи наукового узагальнення, системного аналізу та порівняння сучасних підходів до автоматизації сільськогосподарської техніки. По результатах дослідження встановлено, що інтелектуалізація агромашин базується на поєднанні автоматизованого керування рухом агрегатів, адаптивного регулювання параметрів робочих органів і використання сенсорних систем моніторингу виробничого середовища. Доведено, що інтеграція навігаційних модулів, оптичних сенсорів, датчиків технічного стану машин і цифрових платформ управління дозволяє підвищити точність виконання технологічних операцій і забезпечити оперативне коригування режимів роботи агрегатів. Систематизовано функціональні можливості сенсорних технологій у процесі моніторингу стану посівів, контролю параметрів польових операцій та управління технічним станом машин. Визначено, що ефективність функціонування інтелектуальних агромашин значною мірою залежить від рівня інтеграції сенсорного забезпечення, алгоритмів обробки даних та автоматизованих систем керування. Запропоновано напрями вдосконалення агроінженерних систем, які передбачають поєднання конструктивно-технічних рішень, інформаційно-аналітичних технологій та організаційних підходів до впровадження інтелектуальної техніки у виробничу практику. Проведене дослідження підтверджує, що використання інтелектуальних агромашин створює технічну основу для підвищення точності агротехнологічних операцій і формування адаптивних систем управління польовими процесами. Наукова новизна роботи полягає в систематизації технічних і функціональних компонентів інтеграції автоматизованих машинних систем, сенсорних технологій та алгоритмічної обробки даних в єдину модель функціонування агроінженерних систем точного землеробства.

Ключові слова: агроінженерні системи, роботизовані платформи, цифрове управління агровиробництвом, навігаційні системи, сенсорний моніторинг, диференційовані технологічні операції.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток аграрного виробництва характеризується переходом до високотехнологічних систем управління польовими процесами, де ключову роль відіграють інтелектуальні агромашини та технології точного землеробства. Зростання потреби в підвищенні продуктивності сільськогосподарських

культур, оптимізації використання ресурсів і зменшенні антропогенного навантаження на довкілля зумовлює активне впровадження автоматизованих машинних систем, здатних працювати на основі цифрових даних, сенсорних вимірювань та алгоритмів штучного інтелекту (далі – ШІ). У цьому контексті агроінженерія дедалі більше інтегрує

інформаційні технології, робототехніку та системи дистанційного моніторингу, що забезпечує формування нової парадигми управління агротехнологічними операціями [1; 2, с. 2278–2280].

Однією з ключових проблем сучасного землеробства є необхідність підвищення точності виконання технологічних операцій за умов значної просторової неоднорідності ґрунтів, кліматичних факторів і стану посівів. Традиційні агротехнічні підходи, засновані на усереднених параметрах обробки поля, не забезпечують достатньої ефективності використання матеріальних ресурсів та енергії. У зв'язку з цим активно розвиваються системи точного землеробства, які передбачають застосування інтелектуальних машин, оснащених сенсорами, навігаційними модулями, системами автоматичного керування та програмними засобами аналізу даних [3; 4]. Такі системи дозволяють адаптувати технологічні операції до конкретних умов ділянки поля та забезпечувати більш раціональне використання добрив, засобів захисту рослин і паливно-енергетичних ресурсів.

Особливого значення набуває інтеграція сенсорних технологій, роботизованих механізмів та автоматизованих робочих органів у конструкцію сучасних сільськогосподарських машин. Наприклад, дослідження експлуатаційних характеристик агротехнічних агрегатів свідчать, що застосування автоматизованих систем контролю параметрів роботи робочих органів дозволяє значно підвищити якість виконання польових операцій і зменшити втрати урожаю [5, с. 304–306]. Водночас розвиток роботизованих систем і технологій на основі ІІІ відкриває нові можливості для автономного управління агротехнічними процесами, включаючи диференційовану сівбу, точкове внесення препаратів та інтелектуальний моніторинг стану посівів.

Разом із тим впровадження інтелектуальних агромашин у системах точного землеробства супроводжується низкою наукових і практичних викликів. Серед них слід виокремити необхідність оптимізації алгоритмів управління технологічними операціями, забезпечення надійної роботи сенсорних систем у польових умовах, інтеграцію машинних комплексів із цифровими платформами аграрного менеджменту й економічну доцільність їх використання в різних типах господарств. Незважаючи на значну кількість досліджень у цій сфері, питання комплексної автоматизації агротехнологічних процесів та ефективного використання сенсорних даних для управління інтелектуальними машинами залишаються недостатньо

розкритими, що обумовлює актуальність подальших наукових досліджень у галузі агроінженерії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика застосування інтелектуальних агромашин у системах точного землеробства активно досліджується в сучасній агроінженерній науці. Вагомий внесок у дослідження розвитку технологій точного землеробства зробили М. Падхіарі (М. Padhiary) та ін., які проаналізували перспективні напрями використання робототехніки, ІІІ та автоматизованих платформ у сучасному аграрному виробництві [6]. Подібну позицію висловлюють С. Мансур (S. Mansoor) ін., детально дослідивши роль сенсорних технологій та Інтернету речей (далі – ІоТ) у моніторингу стану агроєкосистем [3]. Водночас у зазначених роботах обмежено розглянуто питання оптимізації конструктивних параметрів сільськогосподарських машин, що потребує подальших досліджень.

Важливе значення для розвитку інтелектуальних агромашин мають дослідження конструктивних і технологічних параметрів робочих органів сільськогосподарських агрегатів. Так, В. Надикто (V. Nadykto) та ін. експериментально дослідили роботу агрегату для скошування рослин із одночасним подрібненням і загортанням пожнивних решток у ґрунт [5]. Подібний підхід простежується в дослідженні Д. Хорта (D. Khort) та ін., які розробили автоматизований мобільний генератор гарячого туману для обробки садових культур. Автори показують, що використання автоматизованих систем управління дозволяє підвищити ефективність обробки рослин, проте їх дослідження обмежене окремими технологічними операціями [7]. Суттєвий внесок у розвиток механічних систем агротехніки зробили В. Осадчий (V. Osadchyy) та ін., які дослідили конструкцію регульованого вібраційного збуджувача для технічних систем [8].

Серед українських науковців дослідження автоматизації агротехнічних процесів є перспективним науковим напрямом. Так, А. Рудь обґрунтовує перспективи розвитку автоматизованих систем сівби та їх роль у підвищенні ефективності аграрного виробництва [9]. У свою чергу, Ю. Осіпов, А. Рудь та Ю. Ляшко розглядають можливості застосування робототехніки та ІІІ для управління агрономічними процесами [10].

Дослідження ефективності впровадження технологій точного землеробства на рівні аграрних підприємств представлені у роботі А. Нефтіссова (A. Neftissov) та ін. [11]. Подібні результати отримали Б. Петрович (B. Petrovic) та ін., які дослідили

використання дронів, сенсорів і роботизованих технологій у фермерських господарствах країн Вишеградської групи [12]. Разом із тим більшість досліджень у цьому напрямі зосереджена на технологічних аспектах моніторингу, а не на оптимізації конструкції машин.

Окрему групу становлять дослідження сенсорних технологій для моніторингу стану рослин. Зокрема, А. Махляйн (А. Mahlein) та ін. дослідили можливості використання оптичних сенсорів і роботизованих систем для раннього виявлення хвороб рослин [13]. Також О. Головня та Ю. Чемерис здійснили аналіз тенденцій інноваційності ринку сільськогосподарської техніки та відзначили зростання попиту на високотехнологічні машини з елементами автоматизації [14].

Отже, аналіз сучасних наукових досліджень свідчить про значний інтерес до проблем автоматизації агротехнічних процесів, розвитку сенсорних технологій і використання ШІ в сільському господарстві. Водночас більшість робіт зосереджена на окремих аспектах точного землеробства: цифровому моніторингу, сенсорних мережах або роботизованих платформах. Питання комплексної інтеграції інтелектуальних агромашин, сенсорних систем та алгоритмів оптимізації технологічних операцій досліджено недостатньо.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження особливостей застосування інтелектуальних агромашин у системах точного землеробства та визначення напрямів підвищення ефективності агротехнологічних операцій на основі автоматизації і сенсорних технологій. Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання дослідження:

1. Дослідити сучасні підходи до автоматизації сільськогосподарських машин у системах точного землеробства.
2. Проаналізувати роль сенсорних технологій і цифрових систем моніторингу в підвищенні точності агротехнологічних операцій.
3. Виявити перспективні напрями вдосконалення інтелектуальних агромашин і сформулювати рекомендації щодо підвищення ефективності їх використання в сучасних агроінженерних системах.

Виклад основного матеріалу. Сучасні інтелектуальні агромашини функціонують як елементи цифрово-керованих виробничих систем, в яких механічні вузли поєднуються з програмними модулями, навігацією й автоматичним контролем технологічних параметрів. Автоматизація агромашин найактивніше розвивається за трьома напрямками: автоматизоване водіння та

позиціонування, адаптивне керування робочими органами й автономне виконання окремих операцій [2, с. 2278–2280]. У праці А. Рудя встановлено, що для посівних систем найбільше значення мають автоматичне дозування, контроль глибини загортання насіння та синхронізація руху агрегату з параметрами висіву [9, с. 74–75]. Це свідчить, що ефективність інтелектуалізації техніки визначається не лише рівнем цифровізації, але і точністю узгодження механічних та електронних компонентів.

Експериментальні праці з агроінженерії підтверджують, що автоматизація дає найкращий результат тоді, коли вона враховує специфіку конкретної операції. Оптимізація режимів роботи агрегату для скошування, подрібнення і загортання решток безпосередньо впливає на стабільність процесу та якість обробітку. Подібний підхід простежується у роботі Д. Хорта та ін., де мобільний генератор гарячого туману розглядається як автоматизований технічний засіб із регульованими параметрами обробки [7]. Отже, автоматизація в точному землеробстві повинна розглядатися як технологія керування функціональними режимами машини, а не лише як засіб зменшення участі оператора.

Систематизація основних технічних напрямів автоматизації інтелектуальних агромашин дозволяє визначити ключові функціональні компоненти сучасних машинних систем точного землеробства. Основні характеристики цих напрямів узагальнені в таблиці 1.

Функціонування інтелектуальних агромашин у системах точного землеробства неможливе без сенсорного забезпечення, яке формує інформаційну основу для прийняття технічних рішень. У сучасних агроінженерних системах використовуються сенсори положення, оптичні сенсори, датчики вологості, температури, тиску, вібрації і біометричних показників рослин [3; 4]. Їх основне призначення полягає у фіксації змін середовища та технічного стану машини в реальному часі. Поєднання дистанційного погодного моніторингу з технологіями точного землеробства підвищує обґрунтованість виробничих рішень на рівні аграрного підприємства [11, с. 86–88]. У цьому випадку сенсорика виконує не допоміжну, а системоутворюючу функцію.

Для агроінженерії принциповим є те, що сенсорні технології забезпечують перехід від усереднених до локалізованих технологічних впливів. У роботах С. Мансура (S. Mansoor) та ін. показано, що інтеграція сенсорів та IoT-систем ство-

рює основу для диференційованого внесення ресурсів та оперативного контролю стану поля [3]. Б. Маноно (В. Маноно) та ін. також акцентують, що точність рішень залежить як від наявності датчиків, так і від якості їх інтеграції в єдину систему збору й обробки даних [4]. У дослідженні А. Махляйна (А. Mahlein) та ін. встановлено, що оптичні сенсори та роботизовані засоби здатні підвищувати точність виявлення фітопатологічних змін на ранніх стадіях розвитку рослин [13]. Тому сенсорний контур інтелектуальної агромашини слід розглядати як інженерний механізм підтримки технологічної точності.

Ефективність роботи інтелектуальних агромашин значною мірою залежить від використання сенсорних технологій, які забезпечують отримання оперативних даних про стан середовища та технічних систем. Функціональні можливості основних типів сенсорів наведено в таблиці 2.

Подальший розвиток інтелектуальних агромашин пов'язаний із поєднанням автоматизації, сенсорних систем та алгоритмічного управління в єдиному технічному контурі. Сучасні наукові підходи підкреслюють перспективність використання робототехнічних рішень і ШІ-технологій для управління агрономічними процесами й опти-

мізації польових операцій. Аналіз міжнародних досліджень також показує, що новий етап розвитку аграрної техніки пов'язаний з інтеграцією безпілотних літальних апаратів, наземних роботизованих платформ, сенсорних мереж і систем цифрового прогнозування. У контексті високоточного й органічного землеробства це означає зміну ролі сільськогосподарської техніки, коли машина поступово переходить від функції механічного виконавця до інтелектуального елемента системи управління агровиробництвом.

З інженерної точки зору найбільш результативними є напрями вдосконалення, які забезпечують одночасно високу точність технологічних операцій, адаптивність до змін умов середовища та стабільність функціонування технічних систем. Сучасні тенденції розвитку ринку аграрної техніки свідчать про зростання попиту на машини, оснащені автоматизованими системами контролю, цифровими інтерфейсами та можливістю обміну даними між окремими агрегатами і платформами управління господарством. Це дозволяє виокремити три групи практичних рекомендацій щодо вдосконалення інтелектуальних агромашин: конструктивно-технічні, інформаційно-аналітичні й організаційно-виробничі. Їх реалізація сприяє

Таблиця 1

Основні напрями автоматизації інтелектуальних агромашин у системах точного землеробства

Напрямок автоматизації	Технічний зміст	Практичний результат для технологічної операції
Автоматизоване водіння	Використання навігаційних систем, автопілотів, позиціонування агрегату	Зменшення перекриттів і пропусків під час обробки поля
Адаптивне керування робочими органами	Автоматичне регулювання висіву, обприскування, глибини обробки	Підвищення точності виконання операції
Автономне виконання операцій	Роботизовані платформи, програмовані режими роботи	Зниження залежності від оператора та стабілізація процесу
Оперативний контроль параметрів машини	Вбудовані датчики, контролери, діагностика стану вузлів	Своєчасне коригування режимів роботи
Інтеграція з цифровими системами управління	Передавання даних у програмні комплекси точного землеробства	Узгодження польових операцій із даними моніторингу

Джерело: узагальнено авторами на основі [1; 2, с. 2278–2280; 3; 7; 9, с. 74–75; 15; 16].

Таблиця 2

Функціональна роль сенсорних технологій у роботі інтелектуальних агромашин

Вид сенсорної технології	Об'єкт контролю	Технологічне призначення	Очікуваний ефект у точному землеробстві
Навігаційні датчики і GPS-модулі	Координати руху машини	Керування траєкторією та дотримання колії	Зменшення перекриттів і пропусків
Оптичні сенсори	Стан рослин, ознаки хвороб, неоднорідність посівів	Локальне виявлення стресу та пошкоджень	Адресне реагування на проблемні ділянки
Датчики погодних параметрів	Температура, вологість, опади, вітер	Коригування часу та режиму виконання операції	Підвищення обґрунтованості рішень
Датчики технічного стану машини	Вібрація, навантаження, тиск	Контроль роботи вузлів і механізмів	Стабілізація технологічного режиму
Інтегровані IoT-системи	Сукупність польових і машинних параметрів	Збирання та передавання даних у цифрову платформу	Оперативне управління процесом

Джерело: узагальнено авторами на основі [3; 4; 5, с. 305–307; 11, с. 86–88; 13; 15; 16].

підвищенню ефективності використання інтелектуальної техніки без зміни базових принципів функціонування систем точного землеробства. Систематизацію відповідних рекомендацій подано в таблиці 3.

Інтелектуальні агромашини забезпечують підвищення точності польових операцій за умови поєднання трьох компонентів: автоматизованого керування, сенсорного забезпечення й алгоритмічної обробки даних. Саме така інтеграція формує технічну основу для оптимізації операцій у системах точного землеробства та відповідає сучасним пріоритетам агроінженерії.

Висновки. Сучасний етап розвитку аграрного виробництва характеризується переходом до технологій точного землеробства, що ґрунтуються на інтеграції інтелектуальних машин, цифрових систем управління та сенсорного моніторингу польових процесів. Підвищення вимог до ефективності використання ресурсів, зниження технологічних втрат і забезпечення стабільності виробництва зумовлює необхідність вдосконалення агроінженерних систем, в яких сільськогосподарські машини функціонують як елементи комплексної інформаційно-технічної інфраструктури. У цьому контексті особливого значення набуває дослідження можливостей автоматизації агромашин, використання сенсорних технологій та оптимізації технологічних операцій у системах точного землеробства, що підтверджується результатами проведеного аналізу матеріалів статті.

Досліджено сучасні підходи до автоматизації сільськогосподарських машин у системах точного землеробства та встановлено, що підвищення ефективності агротехнологічних операцій забезпечується поєднанням автоматизованого

водіння, адаптивного керування робочими органами й автономного виконання окремих технологічних процесів. Проаналізовано роль сенсорних технологій у формуванні інформаційного середовища інтелектуальних агромашин, що дозволяє здійснювати оперативний контроль стану посівів, технічних параметрів машин та умов виконання польових робіт. Сформовані рекомендації щодо вдосконалення інтелектуальних агромашин на основі конструктивно-технічних, сенсорно-інформаційних та алгоритмічних рішень, спрямованих на підвищення точності технологічних операцій і стабільності функціонування агроінженерних систем.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості їх використання під час проєктування і модернізації сільськогосподарських машин, а також при впровадженні цифрових технологій управління агровиробництвом на рівні фермерських та аграрних підприємств. Наукова новизна дослідження полягає в систематизації технічних і технологічних аспектів інтеграції автоматизованих систем керування, сенсорних технологій та алгоритмічного аналізу даних в єдину модель функціонування інтелектуальних агромашин у системах точного землеробства.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення адаптивних алгоритмів керування інтелектуальними агромашинами, удосконалення сенсорних систем моніторингу агроєкосистем та інтеграцію машинних комплексів із цифровими платформами аграрного менеджменту. Перспективним напрямом також є дослідження взаємодії роботизованих машин, безпілотних літальних апаратів і сенсорних мереж в єдиному інформаційному середовищі точного землеробства.

Таблиця 3

Напрями вдосконалення інтелектуальних агромашин і рекомендації щодо їх ефективного використання

Напрямок	Зміст удосконалення / рекомендації	Очікуваний результат
Конструктивно-технічний	Оснащення машин адаптивними системами регулювання робочих органів і вбудованою діагностикою	Стабільність технологічних режимів і зменшення втрат
Сенсорно-інформаційний	Інтеграція польових, машинних і погодних датчиків в єдину систему збору даних	Підвищення точності рішень у реальному часі
Алгоритмічний	Використання моделей ШІ для коригування норм висіву, обробки та внесення ресурсів	Адаптація операцій до умов конкретної ділянки поля
Платформний	Поєднання агромашин із цифровими платформами управління господарством	Централізоване керування технологічними процесами
Організаційно-виробничий	Поетапне впровадження інтелектуальної техніки з урахуванням спеціалізації господарства та підготовки персоналу	Підвищення фактичної віддачі від цифровізації техніки

Джерело: власна розробка авторів.

Список літератури:

1. Jiang L., Xu B., Husnain N., Wang Q. Overview of agricultural machinery automation technology for sustainable agriculture. *Agronomy*. 2025. Vol. 15. No. 6. Article 1471. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy15061471> (дата звернення: 15.03.2026).
2. Adewusi A. et al. Artificial intelligence applications in precision agriculture: a review of technologies for sustainable farming practices. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2024. Vol. 21. No. 1. P. 2276–2285. DOI: <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.21.1.0314> (дата звернення: 15.03.2026).
3. Mansoor S. et al. Integration of smart sensors and IOT in precision agriculture: trends, challenges and future perspectives. *Frontiers in Plant Science*. 2025. Vol. 16. Article 1587869. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1587869> (дата звернення: 15.03.2026).
4. Manono B., Mwami B., Mutavi S., Nzilu F. Precision farming with smart sensors: Current state, challenges and future outlook. *Sensors*. 2026. Vol. 26. Article 882. DOI: <https://doi.org/10.3390/s26030882> (дата звернення: 15.03.2026).
5. Nadykto V. et al. Experimental studies on the operation of agricultural crops mowing unit with simultaneous chopping and incorporation of stubble into the soil. *Agricultural Engineering*. 2023. Vol. 27. No. 1. P. 301–313. DOI: <https://doi.org/10.2478/agriceng-2023-0022> (дата звернення: 15.03.2026).
6. Padhiary M., Kumar A., Sethi L. N. Emerging technologies for smart and sustainable precision agriculture. *Discover Robotics*. 2025. Vol. 1. Article 6. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44430-025-00006-0> (дата звернення: 15.03.2026).
7. Khort D. et al. Automated mobile hot mist generator: A quest for effectiveness in fruit horticulture. *Sensors*. 2022. Vol. 22. No. 9. Article 3164. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22093164> (дата звернення: 15.03.2026).
8. Osadchyy V. et al. Adjustable vibration exciter based on unbalanced motors. *Sensors*. 2023. Vol. 23. Article 2170. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23042170> (дата звернення: 15.03.2026).
9. Рудь А. Перспективи автоматизованих систем сівби та їх вплив на майбутнє сільського господарства. *Таврійський науковий вісник. Серія: Сільськогосподарські науки*. 2024. № 135. Ч. 2. С. 73–78. DOI: <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.135.2.9> (дата звернення: 15.03.2026).
10. Осіпов Ю., Рудь А., Ляшко Ю. Інноваційні підходи до управління агрономічними процесами з використанням робототехніки та штучного інтелекту. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*. 2024. № 45. С. 78–84. DOI: <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2024-4.11> (дата звернення: 15.03.2026).
11. Neftissov A. et al. Assessing the efficiency of using precision farming technology and remote monitoring of weather conditions in agricultural enterprises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 4. No. 13 (130). P. 84–94. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.309028> (дата звернення: 15.03.2026).
12. Petrovic B., Kononets Y., Csambalik L. Adoption of drone, sensor, and robotic technologies in organic farming systems of Visegrad countries. *Heliyon*. 2025. Vol. 11. No. 1. Article e41408. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41408> (дата звернення: 15.03.2026).
13. Mahlein A. et al. From detection to protection: the role of optical sensors, robots and artificial intelligence in plant disease management. *Phytopathology*. 2024. Vol. 114. No. 8. DOI: <https://doi.org/10.1094/PHYTO-01-24-0009-PER> (дата звернення: 15.03.2026).
14. Головня О., Чемерис Ю. Сучасні тренди інноваційності ринку сільськогосподарської техніки в умовах глобального середовища. *Економіка та суспільство*. 2024. № 66. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-66-18> (дата звернення: 15.03.2026).
15. Сільськогосподарська техніка та її види в землеробстві. *EOS Data Analytics*. URL: <https://eos.com/uk/blog/silskohospodarska-tekhnika/> (дата звернення: 17.03.2026).
16. Технології точного землеробства. *CNH Industrial America*. URL: <https://www.caseih.com/uk-ua/ukraine/products/precision-technology> (дата звернення: 17.03.2026).

Rud A.V., Rud A.V. INTELLIGENT AGRICULTURAL MACHINES IN PRECISION FARMING SYSTEMS: AUTOMATION, SENSOR TECHNOLOGIES AND OPTIMIZATION OF OPERATIONS

The active introduction of digital technologies, automated control systems, and sensor-based monitoring of production processes accompanies the modern development of agriculture. In these conditions, intelligent agricultural machines become key elements of the technological infrastructure of precision agriculture, ensuring the adaptation of field operations to the spatial heterogeneity of soils, climatic factors, and crop conditions. The purpose of the study is to determine the features of the application of intelligent agricultural machines in precision agriculture systems and to substantiate directions for increasing the efficiency of agrotechnological operations based on automation, sensor monitoring, and digital control of production processes. The study used methods of scientific generalization, system analysis and comparison of modern approaches to the automation

of agricultural machinery. According to the results of the study, the intellectualization of agricultural machines is based on a combination of automated control of unit motion, adaptive regulation of the parameters of working bodies, and the use of sensor systems for monitoring the production environment. It has been proven that integrating navigation modules, optical sensors, machine condition sensors, and digital control platforms increases the accuracy of technological operations and ensures prompt adjustment of unit operating modes. The functional capabilities of sensor technologies for monitoring crop conditions, controlling field operation parameters, and managing the technical condition of machines are systematized. It is determined that the efficiency of intelligent agricultural machines largely depends on the level of integration of sensor support, data processing algorithms, and automated control systems. Directions for improving agricultural engineering systems are proposed, involving a combination of design and technical solutions, information and analytical technologies, and organizational approaches to the implementation of intelligent equipment in production practice. The conducted study confirms that the use of intelligent agricultural machines provides a technical basis for improving the accuracy of agricultural technological operations and for the development of adaptive field process management systems. The scientific novelty of the work lies in the systematization of the technical and functional components of integrating automated machine systems, sensor technologies, and algorithmic data processing into a single model of the functioning of agro-engineering systems for precision agriculture.

Keywords: *agro-engineering systems, robotic platforms, digital management of agricultural production, navigation systems, sensor monitoring, differentiated technological operations.*

Дата першого надходження статті до видання: 26.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Syromiatnikov M.V.<https://orcid.org/0000-0002-0610-3639>

Odesa Polytechnic National University

A CONTEXT-EFFICIENT EVIDENCE-BASED TECHNOLOGY FOR AUTOMATED REPOSITORY-LEVEL SOFTWARE QUALITY EVALUATION USING LARGE LANGUAGE MODELS

Large language models are increasingly applied to software engineering tasks that require reasoning over repository-scale context, including architecture and security assessments. For repositories that still fit into a single prompt, direct full-context ingestion provides a strong reference condition as it exposes the model to the broadest available set of raw repository evidence at once. However, such evaluation remains expensive, weakly interpretable, and sensitive to context limitations, especially when relevant signals are dispersed across source code, configurations, and workflows. Retrieval-only solutions partially reduce prompt size but often fragment architectural context, while deterministic tools provide transparent yet incomplete signals that do not form a coherent repository-level judgment.

This paper proposes a context-efficient evidence-based technology for automated repository-level software quality evaluation. The technology combines a weighted rubric graph, repository-adaptive activation, bounded evidence collection, deterministic tool-supported signals, LLM-assisted scoring, and deterministic hierarchical aggregation to produce final scores with confidence diagnostics. A distinctive feature is the use of SiMAL as a compact machine-readable representation to support activation and targeted evidence acquisition.

The experimental part compares the proposed technology with direct full-context evaluation. Results indicate that while full-context evaluation remains a strong baseline for repositories fitting into a single prompt, the proposed technology substantially reduces peak per-call context requirements by decomposing the assessment into bounded, inspectable scoring steps. Although this decomposition increases total token volume, it enables repository-level evaluation under stricter context budgets, improves evidence traceability, and provides a realistic foundation for adapting smaller open-weight models to scoring tasks.

Keywords: repository-level evaluation, software quality assessment, large language model, evidence-based scoring, software architecture, static analysis, retrieval-augmented software engineering.

Formulation of the problem. The rapid advancement of large language models has broadened the scope of artificial intelligence (AI) in software engineering. Early machine learning (ML) systems were mostly limited to code completion or other local file-level tasks, whereas recent models and agent-based systems can operate over multi-file repositories and support project-wide modification, repository summarization, and automated pull request review [1, pp. 2-3; 2, pp. 1-2; 3, pp. 1-3]. Existing AI-assisted review tools mainly provide comments or recommendations for selected fragments, but they rarely produce an end-to-end interpretable, evidence-grounded, and reproducible assessment of repository quality as an integral software artifact. This creates a practical need for methods that can systematically evaluate repositories, beyond isolated code snippets or pull request changes.

At the same time, repository-level quality evaluation remains difficult for several reasons. First, even very large context windows do not guarantee reliable use of all information contained in long inputs [4, pp. 163-167; 5, pp. 3639-3641]. Recent studies show that relevant evidence may be overlooked or used inconsistently when scattered within long prompts. This limitation is especially pronounced in large software projects, where quality-relevant signals are highly dispersed across diverse, heterogeneous artifacts rather than localized in single files. Second, pure retrieval-based approaches partially mitigate the context bottleneck, but they often expose only a subset of local artifacts. Such evidence may be insufficient for architecture-sensitive evaluation tasks, where module boundaries, interface contracts, deployment structure, and cross-component dependencies play a vital role [6, pp. 7150-7152; 7, pp. 1-2].

Third, black-box LLM-driven evaluation of a large repository is difficult to audit: it is often unclear which evidence influenced the result, how missing evidence was treated, and whether the obtained judgment can be reproduced given the non-deterministic nature of LLM.

Another practical difficulty is that repository review requires both deterministic and semantic assessment. Some repository properties can be checked directly, for example, the existence of specific files, CI workflows, dependency locks, or leaked secrets. Other properties require broader contextual judgment, such as modularity quality, separation of concerns, architectural consistency, or documentation usefulness. Therefore, a practical repository-level evaluation method should combine explicit deterministic evidence handling with selective model-based reasoning [8, pp. 1117-1120; 9, pp. 614-616].

While direct full-context ingestion serves as a natural baseline for smaller codebases, this approach becomes increasingly expensive, less interpretable, and harder to scale as repository size and artifact diversity grow. This motivates a repository-level evaluation technology that combines bounded-context assessment, evidence grounding, deterministic aggregation, and explicit uncertainty diagnostics. Such technology is relevant to both repository-level software engineering research and practical tasks such as engineering audits, technical due diligence, security triage, and quality monitoring across project portfolios. It is also important because reducing peak context requirements provides a more practical foundation for in-house deployment and adaptation of smaller, open-weight models for repository-level analysis tasks, which may improve data control and reduce security risks associated with external processing.

Analysis of recent research and publications.

While recent systems demonstrate substantial progress in applying large language models to software engineering [1, pp. 2-3], repository-level tasks remain considerably more difficult than function-level ones as they require cross-file dependency understanding, navigation over configuration artifacts, and coherent reasoning over architecture and workflow structure [6, pp. 7150-7152; 7, pp. 1-2]. A major limitation in such tasks is the context bottleneck. Simply expanding the context window does not resolve this, as the model's performance frequently fluctuates when navigating weakly structured or highly dispersed project files. Consequently, evaluating quality at the repository scale remains a complex challenge, as cross-component dependencies and architectural evidence are rarely localized and often span multiple representation layers of the same system.

One established direction for mitigating context limits is retrieval- and planning-based repository interaction. RepoCoder applies iterative retrieval and generation for repository-level code completion [10, p. 1], while CodePlan formulates repository-level coding as a planning problem [11, p. 1]. SWE-agent and AutoCodeRover demonstrate that tool-augmented, repository-aware interaction can improve software engineering performance [2, p. 1; 3, p. 1]. However, these approaches primarily focus on code generation, patching, or issue resolution rather than repository-level quality evaluation. Moreover, retrieval-based interaction often fragments understanding by exposing only local snippets detached from their broader architectural context.

Another direction uses structure-aware repository representations. Approaches such as RepoGraph and the Code Graph Model use structure-aware repository representations to provide a global structural overview without relying on flat-file ingestion [7, pp. 1-2; 12, pp. 1-2]. Similarly, SiMAL provides a prompt-efficient domain-specific language for software representation [13, pp. 113-118]. However, these abstractions, which effectively expose links between components, typically enable navigation or bug localization rather than evidence-based scoring with deterministic aggregation.

Automated code review is another directly relevant area. Industrial studies indicate growing interest in LLM-based review systems, including review recommendation, review comment generation, and pull-request evaluation [14, p. 1; 15, p. 1; 16, p. 1]. At the same time, most existing review work remains centered on patches or pull requests rather than full-repository quality scoring with explicit evidence traces. In contrast to the limited scope of automated pull-request reviews, deterministic tooling remains an essential baseline for full-project coverage. Static application security testing, software composition analysis, secret scanners, linters, and complexity analyzers provide transparent and reproducible quantitative signals [9, pp. 614-616; 17, pp. 308-309; 18, p. 1], but are strictly limited to properties formalizable through predefined rules.

To address the semantic limitations of deterministic tools, recent judge-oriented frameworks (e.g., G-Eval, Prometheus, JudgeLM) increasingly rely on criteria-guided LLM evaluation [19, pp. 2511-2513; 20, pp. 1-2; 21, pp. 1-3]. In parallel, weighted aggregation of lower-level software metrics into higher-level quality estimates has been studied as a separate problem in software-quality evaluation [8, pp. 1117-1120; 22, pp. 1-3]. Collectively, these studies support the use

of explicit criteria, fixed scoring dimensions, and constrained outputs. However, a critical gap remains: the field lacks an integrated framework bridging deterministic static analysis with selective semantic reasoning. Specifically, there is a need for a structural representation that goes beyond simple summarization to actively drive routing and targeted evidence acquisition for reproducible, repository-level evaluation.

Task statement. The identified limitations of existing repository-level analysis approaches dictate the need for a technology that integrates explicit evidence handling with the semantic flexibility of LLM-based assessment under practical context constraints. The aim of this research is to develop and substantiate a context-efficient technology for automated repository-level software quality evaluation that synthesizes bounded evidence collection, deterministic tool-supported signals, selective large language model reasoning, and deterministic aggregation, while minimizing peak per-call token requirements and preserving the auditability of intermediate evaluation stages.

To achieve this aim, the following objectives are defined:

- 1) to design a staged repository-level evaluation architecture that unifies quality criteria, bounded evidence collection, and deterministic score formation;

- 2) to define an approach to repository analysis that fuses deterministic signals from software artifacts and analysis tools with LLM-based judgment;

- 3) to incorporate a compact structural repository representation based on SiMAL for repository routing and targeted evidence acquisition;

- 4) to implement and experimentally evaluate the proposed technology on real software repositories under repository-scale context constraints;

- 5) to compare the proposed approach with direct full-context repository evaluation, with an emphasis on assessment quality, the trade-off between peak per-call context and total token consumption, and evidence traceability.

Outline of the main material of the study. General architecture of the proposed technology. The proposed repository-level quality evaluation technology is implemented as a staged bounded-context evaluator that transforms rubric-defined criteria and evidence from repository artifacts into a final weighted quality score, along with confidence and coverage diagnostics (Fig. 1).

This includes the following artifacts: rubric groups that define what must be evaluated; evidence profiles that define how evidence must be gathered; the activation logic that selects applicable rubrics; the scoring logic that evaluates rubric criteria; and the aggregation

logic that composes all partial judgments into a single final result. At the conceptual level, the technology consists of seven stages: (1) environment configuration, (2) structural context distillation, (3) rubric activation, (4) bounded evidence collection, (5) deterministic and/or LLM-assisted scoring, (6) bottom-up aggregation, and (7) structured report generation.

A key property of the proposed approach is auditability. Each stage produces explicit artifacts, including activation prompts and outputs, evidence bundles, tool outputs, cached LLM responses, token-usage records, and aggregation summaries. Therefore, the system does not operate as a single black-box prompt akin to LLM-as-a-Judge, but rather as an interpretable evaluation pipeline. The source code of the proposed technology is available at <https://github.com/niksyromyatnikov/SAGES>.

Rubric model and repository-adaptive activation. The evaluation target is formalized as a weighted rubric hierarchy with four distinct levels: repository, module, group, and leaf (Fig. 2). Modules represent broad quality dimensions such as architecture, security, observability, and domain-specific engineering concerns. Groups divide each module into narrower evidence families. Leaves are concrete evaluative statements scored on a bounded numeric scale. In this way, the rubric is used not only as a quality model, but also as an explicit constraint on evaluation, since all later scoring is performed only over predefined groups and leaf criteria rather than by free-form repository judgment.

The rubric is repository-adaptive. Core modules are usually applicable for all repositories, whereas domain-specific ones (e.g., library-, web app-, or ml-oriented) are activated only when supported by repository signals. The activation stage is therefore not a quality assessment stage, but a top-down routing stage. Its function is to determine which groups should be considered and which evidence should be retrieved for them.

The activation step is performed by LLM using a pre-built structured repository context built with SiMAL domain-specific language and produces: a list of programming languages used in repository, inferred repository signals (such as presence or absence of API, database interaction, containerization etc.), module and group activation decisions with rationale, confidence values, and structured evidence hints derived from SiMAL repo schema. These hints are later reused to guide targeted evidence collection. Therefore, activation serves two purposes simultaneously: applicability selection and downstream retrieval planning.

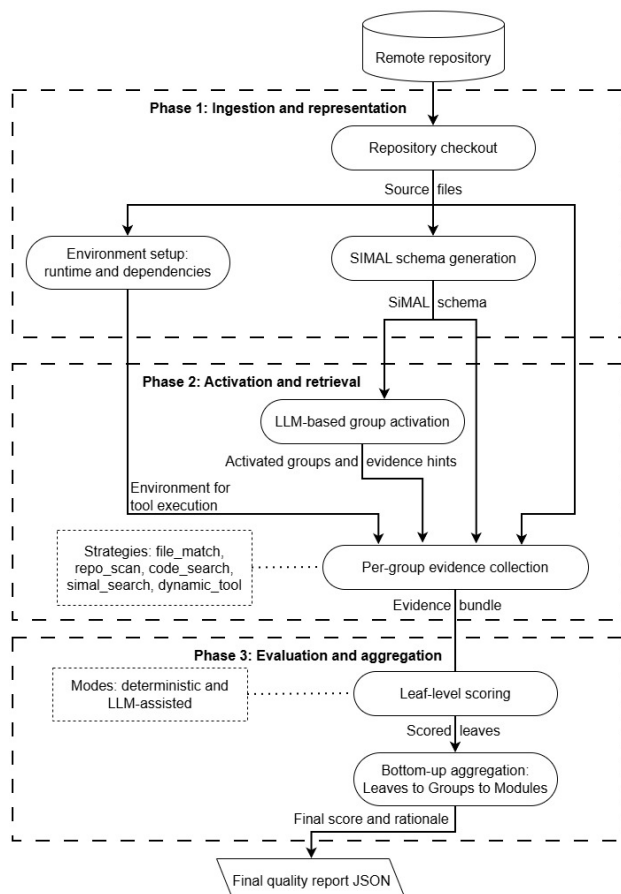


Fig. 1. General architecture of the proposed technology

Source: compiled by the authors

Evidence profiles and bounded evidence collection. Each rubric group references an evidence profile (Fig. 3) that specifies its grading mode and a list of evidence steps. The supported evidence strategies include file matching, repository scan, bounded code search, search over SiMAL schema, and dynamic execution of external analysis tools. Therefore, evidence profiles are the main mechanism that connects the abstract rubric to concrete repository inspection procedures.

The evidence layer is intentionally bounded. File matching detects expected artifacts such as README files, lockfiles, CI workflows, Dockerfiles, change-logs, or security-policy files. A repository scan provides lightweight structural metadata about the top-level layout, entry points, generated artifacts, large binary files, and general repository hygiene. Code search performs bounded regex and snippet retrieval across repository files, skipping generated, minified, binary-like, or overly large directories. SiMAL search performs a similar retrieval procedure over a compact structural schema instead of the raw source tree.

In addition, the proposed technology includes a second retrieval phase driven by activation-time evidence hints derived from the SiMAL schema (path annotations, component or method names, etc.). This phase can directly load path-anchored artifacts, expand globs, or run a targeted search based on components and keywords suggested during

```

modules:
...
- id: C
  name: Architecture & dependency structure
  module_weight: 0.10
  applies_if: always
  groups:
    - id: C1
      name: Modularity & boundaries
      group_weight: 0.45
      evidence_profile: simal_modularity_and_interfaces
      leaves:
        - C1.1: "Clear module/package boundaries exist (no 'god' module)."

```

Fig. 2. Excerpt of architectural group C from the rubric model

Source: compiled by the authors

activation. As a result, evidence collection becomes more group-specific and less dependent on generic retrieval. This design also reduces dependence on large repository prompts by constructing smaller evidence bundles tailored to the current scoring group.

Runtime-aware tool integration. To ensure the reliable execution of deterministic tools (e.g., linters, scanners), the technology performs preflight detection of repository languages and runtime dependencies, applying bounded resolution to mitigate environment-mismatch failures. Tools are executed via a unified registry that maps abstract evidence classes to concrete, cached commands. Crucially, a normalization layer converts heterogeneous raw outputs (JSON, XML, or unstructured text) into a compact structured summary, ensuring the scoring stage operates on normalized evidence.

Leaf-level scoring protocol. Following evidence collection, each active group is evaluated leaf by leaf. For each group, the system constructs a structured scoring prompt that includes repository identity, module and group context, the exact predefined leaves, the compact evidence bundle, and activation context. This design intentionally constrains the model to criteria-guided judgment: it does not produce an unconstrained repository review but evaluates only the predefined leaf statements within a fixed, structured output schema. As a result, repository-level evaluation is decomposed into multiple scoring calls

rather than a single full-context judgment across the entire repository, effectively neutralizing the context bottleneck.

Two scoring paths are supported. The first path applies deterministic rules for selected evidence profiles. The second path uses an LLM under a strict JSON output contract. If LLM scoring fails, the system does not terminate the whole run. Instead, it emits explicit failure states for the affected leaves and lowers confidence.

Deterministic hierarchical aggregation. Final repository-level judgments are composed deterministically from lower-level leaf assessments. The score of a group is computed as:

$$score_{group} = \frac{\sum_i s_i w_i}{\sum_i w_i} \quad (1)$$

where i – leaf index; s_i – the score of an included leaf; w_i – weight of the i -th leaf.

Thus, the final repository score is not produced in one step, but by transparent bottom-up composition from leaf-level evidence-backed judgments to group-, module-, and repository-level estimates. Under the current policy, leaves with insufficient evidence or tool failure are excluded from the score numerator and denominator rather than automatically penalized. This prevents the system from conflating lack of evidence with poor quality. At the same time, confidence is reduced by evidence coverage and by the fraction of leaves that require human review.

```
evidence_profiles:
...
simal_modularity_and_interfaces:
  grading_mode: llm_assisted
  evidence:
    - strategy: simal_search
      max_snippet_lines: 50
      queries:
        - "service "
        - "components:"
        - "api:"
    - strategy: repo_scan
      checks: ["file_tree_top", "languages_detected", "main_entry_candidates"]
    - strategy: code_search
      queries:
        - "internal/"
        - "routes/"
        - "services"
...
```

Fig. 3. Excerpt of evidence collection with profile for group C1

Source: compiled by the authors

Module scores are computed as weighted means of enabled group scores:

$$score_{module} = \frac{\sum_j score_{group_j} * w_{group_j}}{\sum_j w_{group_j}} \quad (2)$$

where j – group index; $score_{group_j}$ – the calculated score of the j -th enabled group; w_{group_j} – assigned weight of the j -th group.

In addition to numeric scores, the final report contains coverage ratio, evidence sufficiency ratio, counts of non-applicable leaves, insufficient-evidence leaves, failed-tool leaves, and leaves that still require human review. This makes the final result more interpretable than a single undifferentiated repository score.

Role of SiMAL in the proposed technology. Within this pipeline, SiMAL is used as more than a compact repository summary [13, pp. 117-118]. It acts as a machine-readable structural control layer that actively drives two critical bounded-context stages: semantic rubric activation (by exposing components, interfaces, and technology signals) and targeted evidence collection (via schema search and activation-derived hints). This structured routing substantially reduces the need to repeatedly expose the model to the full repository context.

Experimental design. The empirical study was conducted on a curated repository corpus (Table 1) selected to balance technological coverage, repository-type diversity, and practical feasibility of full-context evaluation.

Because the current implementation supports Python, Go, PHP, JavaScript/TypeScript, Docker, and Kubernetes-related artifacts, the corpus was restricted to repositories from these stacks. The final set includes frameworks, reusable libraries, application-style repositories, and infrastructure-oriented projects, while keeping single-call baseline evaluation within the prac-

tical context budget of the scoring model. Repository size was measured using the o200k_base tokenizer employed by the GPT model series.

The study compares two repository-level evaluation strategies. The first strategy is a direct full-context single-call baseline, in which the repository source context is passed to one LLM prompt along with the evaluation instructions, and the model directly returns rubric activation decisions and leaf-level judgments. The second strategy is the proposed staged technology, in which the same repository is evaluated through repository-adaptive activation, bounded evidence collection, group-level scoring, and deterministic aggregation. In both cases, final repository-level results are computed by aggregating leaf-level outputs through an identical deterministic procedure, thereby preserving strict comparability of the scores.

Both strategies used GPT-5.2 with medium reasoning effort as the scoring model. Evaluation quality was then assessed by an independent LLM-as-a-Judge protocol implemented with GPT-5.4 and high reasoning effort. The judge received the full repository source content, the evaluation rubric, the normalized candidate assessment object, and the normalized repository tool evidence. It scored each candidate along six rubric-based dimensions: structural score correctness, issue correctness, issue coverage, confidence calibration, interpretability, and activation correctness. In addition, the judge counted concrete error categories, including major and minor score mismatches, missing relevant groups, irrelevant groups, missed issues, overstated issues, and confidence errors. Structural score correctness reflects agreement of module-, group-, and leaf-level scores with repository evidence; issue correctness and issue coverage refer respectively to the validity and completeness of

Table 1

GitHub repositories sampled for evaluation

GitHub repository	Stack	Description	Tokens	Folders	Files
marshmallow-code/marshmallow	Python	data serialization library	193,097	14	98
encode/starlette	Python	ASGI web framework	195,400	15	118
go-chi/chi	Go	web framework	98,821	24	91
spf13/cobra	Go	CLI app framework	165,416	9	63
jesseduffield/lazydocker	Go	terminal application	169,913	29	128
slimphp/slim	PHP	web framework	136,434	26	144
spatie/laravel-permission	PHP	authorization package	168,245	36	160
laravel/lumen-framework	PHP	lightweight framework	59,691	27	60
koajs/koa	JavaScript	Node.js framework	78,977	11	99
pmndrs/zustand	TypeScript	state-management library	178,875	33	124
unjs/h3	TypeScript	server framework	195,922	30	192
dockersamples/example-voting-app	Polyglot / Docker	multi-service application	28,320	13	45

Source: compiled by the authors

identified weaknesses; confidence calibration measures whether confidence values are proportional to evidence strength; interpretability reflects traceability of judgments to evidence; and activation correctness measures whether relevant scoring groups were included and irrelevant ones excluded.

Results and discussion. The evaluation results are analyzed across two dimensions: token usage efficiency and assessed evaluation quality. Table 2 compares the token statistics of the direct full-context baseline against the proposed staged technology. The results show the proposed approach substantially reduces average and maximum per-call token requirements by decomposing repository-level assessment into bounded scoring requests. For example, the marshmallow repository's maximum LLM context size decreased from 291,655 tokens to 46,437 tokens - an 84% reduction in peak memory requirements. Such a reduction reduces dependence on large single-call context windows, making repository-level assessment computationally feasible in constrained deployment settings.

At the same time, this advantage is achieved at the cost of higher total token usage, since the repository is assessed repeatedly across rubric groups. In addition, iterative SiMAL schema generation introduces an extra one-time preprocessing cost, which is reported separately in Table 2. This separation is intentional, as schema generation is not part of the per-group scoring stage itself and may be reused as an intermediate artifact for repeated evaluation of the same repository. Moreover, its token footprint depends heavily on the batching policy and can be further optimized by adjusting the number of files processed per request.

Table 3

LLM-as-a-Judge evaluation results

Metric	Full context LLM	Proposed Technology
Average Scores (1-5, higher is better)	—	—
Score correctness	4	4
Issue correctness	4.33	4.17
Issue coverage	4.08	4
Confidence calibration	4	4
Interpretability grounding	4.17	4
Activation scope correctness	4.75	4.5
Total Counts (lower is better)	—	—
Major score mismatches	3	7
Minor score mismatches	13	17
Missed issues	8	7
Overstated issues	1	9
Confidence errors	6	9

Source: compiled by the authors

Table 3 presents the LLM-as-a-Judge comparison. The results indicate that direct full-context evaluation remains a strong baseline for repositories that comfortably fit into a single prompt. The baseline achieved slightly higher judged quality across most dimensions, particularly in minimizing overstated issues and major score mismatches. However, the proposed staged technology remained highly competitive, matching the baseline in structural score correctness and confidence calibration, while performing closely in issue coverage.

Eventually, the proposed approach proves it is possible to maintain precise evaluation while eliminating the peak context bottleneck. This, in turn, helps establish a practical foundation for evaluating massive repositories or adapting smaller, open-weight models to complex scoring tasks.

Table 2

Token usage statistics

Repository name	Full context Avg/Max/ Total tokens	Proposed technology					
		Scoring			Schema generation		
		Avg tokens	Max tokens	Total tokens	Avg tokens	Max tokens	Total tokens
marshmallow	291,655	23,765	46,437	712,949	34,960	72,834	489,433
starlette	291,026	26,574	53,608	1,009,796	30,125	82,174	451,862
chi	179,783	25,277	59,347	960,505	26,121	67,828	600,769
cobra	258,061	23,317	44,864	722,805	38,173	96,316	343,556
lazydocker	251,922	27,591	55,747	938,091	28,332	77,020	764,956
slim	232,520	22,018	49,964	770,612	31,630	64,828	822,366
laravel-permission	269,624	27,096	67,215	948,337	34,289	114,042	994,374
lumen-framework	126,613	22,433	48,361	829,994	24,996	35,826	549,912
koa	147,714	22,256	35,903	801,198	20,784	37,854	228,624
zustand	277,865	27,983	56,789	1,035,368	29,364	70,214	910,303
h3	290,187	29,107	74,943	1,106,057	32,597	84,938	912,739
example-voting-app	58,723	16,991	28,110	713,586	16,110	34,492	209,435

Source: compiled by the authors

Conclusions. This research proposed a context-efficient, evidence-based technology for repository-level software quality evaluation. By leveraging a compact structural representation to drive bounded evidence collection and deterministic hierarchical aggregation, the architecture decomposes the assessment into multiple inspectable scoring steps. Experimental results confirm that while direct full-context evaluation remains a strong baseline with slightly higher judged quality, the proposed technology substantially reduces peak per-call token requirements while preserving an accurate usable quality assessment. Therefore, this approach serves as a highly auditable, bounded-context alternative designed for stricter memory budgets.

This architectural trade-off has significant practical implications. While a single full-context evaluation call regularly consumed between 150,000 and 300,000 input tokens, the largest staged scoring calls were substantially smaller. Although the proposed pipeline currently results in a higher total token consumption across its lifecycle, eliminating the peak context bottleneck establishes a realistic foundation for analyzing massive repositories and enabling secure, in-house deployments. Future research will focus on reducing the total token footprint, optimizing SiMAL generation costs, and fine-tuning medium-sized, open-weight models specifically for these scoring tasks.

Bibliography:

1. Hou X., Zhao Y., Liu Y. et al. Large Language Models for Software Engineering: A Systematic Literature Review. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*. 2024. Vol. 33, no. 8. Art. 220. DOI: 10.1145/3695988.
2. Yang J., Jimenez C.E., Wettig A. et al. SWE-agent: Agent-Computer Interfaces Enable Automated Software Engineering. *Proceedings of the Twelfth International Conference on Learning Representations (ICLR 2024)* (Vienna, Austria, May 7-11, 2024). 2024.
3. Zhang Y., Pan R., Chen K. et al. AutoCodeRover: Autonomous Program Improvement. *Proceedings of the 33rd ACM SIGSOFT International Symposium on Software Testing and Analysis (ISSTA '24)* (Vienna, Austria, September 16-20, 2024). 2024. DOI: 10.1145/3650212.3652131.
4. Liu N.F., Lin K., Hewitt J. et al. Lost in the Middle: How Language Models Use Long Contexts. *Transactions of the Association for Computational Linguistics*. 2024. Vol. 12. P. 157–173. DOI: 10.1162/tacl_a_00638.
5. Bai Y., Tu S., Zhang J. et al. LongBench v2: Towards Deeper Understanding and Reasoning on Realistic Long-context Multitasks. *Proceedings of the 63rd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 1: Long Papers)* (Vienna, Austria, July 27-August 1, 2025). 2025. P. 3639-3664. DOI: 10.18653/v1/2025.acl-long.183.
6. Du J., Liu Y., Guo H. et al. DependEval: Benchmarking LLMs for Repository Dependency Understanding. *Findings of the Association for Computational Linguistics: ACL 2025*. 2025. P. 7150-7179. DOI: 10.18653/v1/2025.findings-acl.373.
7. Ouyang S., Yu W., Ma K. et al. RepoGraph: Enhancing AI Software Engineering with Repository-level Code Graph. *arXiv*. 2024. URL: <https://arxiv.org/abs/2410.14684> (дата звернення: 24.03.2026).
8. Mordal K., Anquetil N., Laval J. et al. Software quality metrics aggregation in industry. *Journal of Software: Evolution and Process*. 2013. Vol. 25, no. 10. P. 1117-1135. DOI: 10.1002/smr.1558.
9. Bennett G., Hall T., Winter E., Counsell S. Semgrep: Improving the Limited Performance of Static Application Security Testing (SAST) Tools. *Proceedings of the 28th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering (EASE '24)* (Salerno, Italy, June 18-21, 2024). 2024. P. 614-623. DOI: 10.1145/3661167.3661262.
10. Zhang F., Chen B., Zhang Y. et al. RepoCoder: Repository-Level Code Completion Through Iterative Retrieval and Generation. *arXiv*. 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2303.12570> (дата звернення: 26.03.2026).
11. Bairi R., Sonwane A., Kanade A. et al. CodePlan: Repository-level Coding using LLMs and Planning. *arXiv*. 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2309.12499> (дата звернення: 27.03.2026). DOI: 10.48550/arXiv.2309.12499.
12. Tao H., Zhang Y., Tang Z. et al. Code Graph Model (CGM): A Graph-Integrated Large Language Model for Repository-Level Software Engineering Tasks. *arXiv*. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2505.16901> (дата звернення: 27.03.2026). DOI: 10.48550/arXiv.2505.16901.
13. Syromiatnikov M.V., Ruvinskaya V.M. A system internals modeling and annotation language for large language model-driven software engineering. *Applied Aspects of Information Technology*. 2026. Vol. 9, no. 1. P. 103-121. DOI: 10.15276/aait.09.2026.08.
14. Li Z., Lu S., Guo D. et al. Automating Code Review Activities by Large-Scale Pre-training. *arXiv*. 2022. URL: <https://arxiv.org/abs/2203.09095> (дата звернення: 24.03.2026). DOI: 10.48550/arXiv.2203.09095.
15. Cihan U., Haratian V., İçöz A. et al. Automated Code Review In Practice. *arXiv*. 2024. URL: <https://arxiv.org/abs/2412.18531> (дата звернення: 27.03.2026).

16. Tufano R., Bavota G. Automating Code Review: A Systematic Literature Review. *arXiv*. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2503.09510> (дата звернення: 25.03.2026). DOI: 10.48550/arXiv.2503.09510.
17. McCabe T.J. A Complexity Measure. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 1976. Vol. SE-2, no. 4. P. 308-320. DOI: 10.1109/TSE.1976.233837.
18. Basak S.K., Cox J., Reaves B., Williams L. A Comparative Study of Software Secrets Reporting by Secret Detection Tools. *Proceedings of the ACM/IEEE International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement (ESEM)* (New Orleans, USA, October 23-27, 2023). 2023. P. 1-12. DOI: 10.1109/ESEM56168.2023.10304853.
19. Liu Y., Iter D., Xu Y. et al. G-Eval: NLG Evaluation using GPT-4 with Better Human Alignment. *Proceedings of the 2023 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing* (Singapore, December 6-10, 2023). 2023. P. 2511-2522. DOI: 10.18653/v1/2023.emnlp-main.153.
20. Kim S., Shin J., Cho Y. et al. Prometheus: Inducing Fine-grained Evaluation Capability in Language Models. *Proceedings of the Twelfth International Conference on Learning Representations (ICLR 2024)* (Vienna, Austria, May 7-11, 2024). 2024.
21. Zhu L., Wang X., Wang X. JudgeLM: Fine-tuned Large Language Models are Scalable Judges. *arXiv*. 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2310.17631> (дата звернення: 26.03.2026). DOI: 10.48550/arXiv.2310.17631.
22. Ulan M., Löwe W., Wingkvist A. Weighted software metrics aggregation and its application to defect prediction. *Empirical Software Engineering*. 2021. Vol. 26. Art. 86. DOI: 10.1007/s10664-021-09984-2.

Сиром'ятніков М.В. КОНТЕКСТНО-ЕФЕКТИВНА ДОКАЗОВА ТЕХНОЛОГІЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА РІВНІ РЕПОЗИТОРІЮ З ВИКОРИСТАННЯМ ВЕЛИКИХ МОВНИХ МОДЕЛЕЙ

Великі мовні моделі дедалі ширше застосовуються для розв'язання задач інженерії програмного забезпечення, що потребують міркувань у масштабі всього репозиторію, зокрема для оцінювання архітектури та аналізу безпеки. Для репозиторіїв, які ще можуть бути подані в межах одного запиту, безпосереднє використання повного контексту є сильним еталонним підходом, оскільки надає моделі доступ до максимально повного набору доказів із репозиторію. Проте таке оцінювання залишається дорогим, слабо інтерпретованим і чутливим до обмежень контексту, особливо коли релевантні сигнали розосереджені між вихідним кодом, конфігураційними файлами та робочими процесами. Підходи, що базуються на пошуку, дозволяють частково зменшити обсяг контексту, але вони часто фрагментують архітектурну картину системи, тоді як детерміновані інструменти забезпечують прозорі, проте неповні сигнали, які самі по собі не формують цілісного судження про якість репозиторію.

У статті запропоновано контекстно-ефективну доказову технологію автоматизованого оцінювання якості програмного забезпечення на рівні репозиторію. Запропонована технологія поєднує зв'язаний граф рубрик, адаптивну до властивостей репозиторію активацію, обмежене збирання доказів, детерміновані сигнали від інструментальних засобів, оцінювання за участю великої мовної моделі та детерміновану ієрархічну агрегацію для формування підсумкових оцінок із діагностикою впевненості. Відмінною особливістю підходу є використання SiMAL як компактного машинозчитуваного подання репозиторію, що підтримує активацію релевантних критеріїв і цілеспрямований збір доказів.

В експериментальній частині запропоновану технологію порівняно з прямим оцінюванням повного контексту. Одержані результати показали, що, хоча оцінювання повного контексту залишається сильним базовим підходом для репозиторіїв, які вміщуються в один запит, запропонована технологія істотно знижує пікові вимоги до контексту на один виклик завдяки декомпозиції процесу оцінювання на обмежені та контрольовані кроки. Попри збільшення загального обсягу токенів, такий підхід робить оцінювання на рівні репозиторію більш придатним для умов жорстких бюджетів контексту, підвищує відстежуваність доказів і створює практичне підґрунтя для адаптації менших моделей із відкритими вагами до задач оцінювання.

Ключові слова: оцінювання на рівні репозиторію, оцінювання якості програмного забезпечення, велика мовна модель, доказове оцінювання, архітектура програмного забезпечення, статичний аналіз, інженерія програмного забезпечення з використанням пошукових підходів.

Дата першого надходження статті до видання: 27.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Ткачов В.М.

<https://orcid.org/0000-0002-6524-9937>

Харківський національний університет радіоелектроніки

Рубан І.В.

<https://orcid.org/0000-0002-4738-3286>

Харківський національний університет радіоелектроніки

РОЗРОБКА МЕТОДУ АНАЛІЗУ ЖИВУЧОСТІ СЕРВІСІВ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ НА МОБІЛЬНІЙ ПЛАТФОРМІ ЗА РЕСУРСНО-ЧАСОВИМИ ЗМІННИМИ

У статті розроблено метод аналізу живучості сервісів інформаційної системи на мобільній платформі за ресурсно-часовими змінними. Актуальність дослідження визначається тим, що такі системи функціонують в умовах динамічної доступності обчислювальних, енергетичних та мережних ресурсів, переривчастої зв'язності, часткової спостережуваності стану і нестаціонарності зовнішніх впливів, за яких критичні порушення формуються на рівні окремих сервісів раніше, ніж на рівні платформи в цілому. Метою роботи є розробка методу формалізованого оцінювання стану сервісів, виявлення передкритичних режимів функціонування та ранжування сервісів для оперативного параметричного керування ресурсами. Метод побудовано на адаптації підходу допустимих множин станів і бар'єрних функцій до сервісного рівня інформаційної системи. Стан сервісу подано вектором нормованих змінних, що включає рівень ресурсного забезпечення, залишковий допустимий час збереження функційної здатності та рівень виконання сервісної функції. Запропоновано показник стану живучості, його похідну за часом, правило виявлення передкритичного режиму, трирівневу класифікацію станів і правило ранжування критичних сервісів. Експериментальна перевірка на серії імітаційних сценаріїв показала, що метод забезпечує завчасне виявлення наближення сервісів до критичної області та формує випереджальний часовий інтервал до досягнення критичного стану. Практична цінність результатів полягає у можливості використання методу як аналітичного модуля в бортових багатосервісних інформаційно-обчислювальних системах мобільних платформ. Метод спирається на величини, доступні в бортовій телеметрії та журналах виконання програмних модулів, що забезпечує його відтворюваність у середовищі імітаційного моделювання та на експериментальному стенді. Для коротких циклів керування.

Ключові слова: живучість сервісів, інформаційна система, ресурсно-часові змінні, передкритичний режим, бар'єрна функція, параметричне керування ресурсами, ранжування сервісів.

Постановка проблеми. Інформаційні системи на мобільних платформах (ІСМП) функціонують в умовах динамічної доступності обчислювальних, енергетичних та мережних ресурсів, переривчастої зв'язності, часткової спостережуваності стану, нестаціонарності навантаження та деструктивних впливів [1–2]. За таких умов живучість доцільно трактувати як здатність системи зберігати або відновлювати виконання критичних функцій у реальному часі за дефіциту ресурсів, порушення зв'язності та порушення стану внутрішніх функційних рівнів [3]. Цьому різновиду інформаційних систем присвячено ряд досліджень [4–5], присвячених багаторівневому

опису ІСМП, що поєднує рівні даних, процесів і ресурсів, причинно-часові інваріанти, допустимі стани та загальні критерії живучості. У роботах [3–5] показано, що сервісний рівень є спостережуваним зрізом функціонування такої системної структури.

В основі проблематики є те, що втрата живучості в ІСМП має характер деградації, у межах якої для сервісу змінюються доступний ресурс, допустима тривалість збереження працездатності, дефіцит виконання вимог до якості обслуговування та можливість утримання функціонування в припустимій області. У ряді досліджень запропоновано підходи до інтегрального оцінювання

живучості в ІСМП [6], ризик-орієнтованого оперативного керування ресурсами [7], прогнозно-адаптивного перерозподілу ресурсів [8], а також сервісно-орієнтованого відновлення критичних сервісів у вікнах зв'язності [9]. Зазначені результати [6–9] орієнтовані на інтегральне оцінювання поточного стану, синтез керувальних дій або формування відновлювальних кроків.

Для оперативного параметричного керування ресурсами необхідно мати аналітичний опис зміни стану сервісу в координатах ресурсу та часу, оцінювання швидкості вичерпання запасу живучості та виявлення сервісів, що наближаються до зниження функціональності ІСМП швидше за інші. За відсутності такого опису керування спирається на інтегральні узагальнені показники, що згладжують критичні локальні епізоди, або на часткові індикатори, які не відображають взаємозв'язку між залишковим ресурсом, часовим запасом та розвитком деградації сервісу [10]. Отже, постає науково-технічна задача розробки методу аналізу живучості сервісів, у якому стан сервісу описується ресурсно-часовими змінними, а сервіс приймається за основну одиницю оцінювання передкритичних режимів функціонування.

Зв'язок цієї задачі з важливими практичними завданнями визначається потребою забезпечення стійкого функціонування бортових та розподілених ІСМП, зокрема систем груп безпілотних платформ, мобільних вузлів зв'язку, розподілених сенсорних мереж тощо [11], у яких рішення щодо перерозподілу ресурсу, допустимої деградації сервісів або пріоритетності підтримки функцій приймаються в коротких інтервалах оперативного керування. У таких системах несвоєчасне виявлення погіршення сервісного стану може призвести до зриву виконання критичної функції раніше, ніж інтегральні показники або механізми відновлення забезпечать достатній ефект [12]. З цієї причини розробка методу аналізу живучості сервісів за ресурсно-часовими змінними є актуальним у вирішенні прикладних задач оперативного забезпечення живучості ІСМП у реальному часі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У останніх дослідженнях сформовано достатньо широкий масив праць, присвячених забезпеченню живучості, стійкості функціонування та відмовостійкості розподілених, кордонних і мобільних обчислювальних середовищ. В оглядових працях [13–15] систематизовано підходи до забезпечення надійного функціонування таких середовищ, виділено завдання доступності, надійності, безпеки, збереження працездатності сервісів,

а також заходи попередження порушень і реагування на них. Для подальшого розгляду важливо, що в цих працях живучість і стійкість функціонування подано як багатокомпонентну властивість, пов'язану з ресурсними обмеженнями, динамікою середовища, порушеннями мережної взаємодії та відмовами програмно-апаратних компонентів.

Окремий напрям формують праці, присвячені керуванню ресурсами та підтриманню безперервності сервісів у кордонних обчисленнях. У роботах [16–17] показано, що ресурсне планування в таких середовищах визначається обмеженістю доступних ресурсів, часовими обмеженнями виконання, міграцією сервісів, зміною умов зв'язку та вимогами до якості обслуговування. Основну увагу в цих публікаціях приділено алгоритмам розподілу ресурсу, перенесенню сервісних екземплярів між вузлами, підтриманню безперервності обслуговування та зменшенню затримок під час функціонування мобільних і кордонних систем.

Прикладні дослідження з оркестрації сервісів і компонентів деталізують цей підхід. У працях [18–19] розглянуто розміщення сервісних компонентів і ланцюгів обслуговування за умов неоднорідності вузлів, обмеженості обчислювальних ресурсів, часових вимог і потреби збереження функційної здатності сервісів. Такі результати підтверджують рівень розвитку напряму, пов'язаного з оркестрацією, розміщенням, параметричним налаштуванням і перебудовою виконання сервісів у динамічному середовищі.

Ще одну важливу групу становлять праці, присвячені каскадним відмовам у мережах Інтернету речей, промислових інформаційних мережах та залежних сервісно-мережних структурах. У роботах [20–22] каскадні відмови визначено як один із ключових чинників втрати функційної здатності складних розподілених середовищ. У цих дослідженнях запропоновано моделі поширення каскаду з урахуванням навантаження, чутливості до перевантаження, міжмережних залежностей, сервісних зв'язків та міжрівневого впливу. Дослідження включають формалізацію механізмів розвитку каскадних порушень і чинників, які прискорюють втрату функційної здатності взаємопов'язаних компонентів.

Отже, проаналізована сукупність рішень охоплює оглядові узагальнення з проблематики живучості й стійкості функціонування розподілених і кордонних систем, методи керування ресурсами, перенесення сервісів і підтримання безперервності обслуговування, підходи до оркестрації сервісних компонентів і ланцюгів оброблення,

а також моделі каскадних відмов у залежних мережах і сервісних структурах. Для задач оперативного параметричного керування ресурсами цього недостатньо, оскільки бракує методу, що дозволяє описувати сервіс через явні ресурсно-часові змінні, оцінювати залишковий інтервал допустимого функціонування, фіксувати темп вичерпання запасу живучості та виявляти передкритичні режими до переходу до процедур керування, відновлення або реконфігурації. Саме ця невирішена частина загальної проблеми визначає зміст даної статті.

Постановка завдання. Метою статті є розробка методу аналізу живучості сервісів інформаційної системи на мобільній платформі за ресурсно-часовими змінними для оцінювання поточного стану сервісу в умовах ресурсних та часових обмежень функціонування. Для досягнення поставленої мети необхідно формалізувати множину сервісів та критичних сервісів інформаційної системи, задати систему ресурсно-часових змінних опису їх стану, визначити показник живучості сервісу та правило виявлення переходу до критичної області функціонування, а також побудувати процедуру аналітичного ранжування сервісів за ступенем наближення до втрати працездатності як основу оперативного параметричного керування ресурсами мобільної платформи.

Виклад основного матеріалу. Стан живучості сервісів ІСМП формалізується за ресурсно-часовими змінними. Для цього використовується підхід допустимих множин станів і бар'єрних функцій, який застосовують у задачах аналізу динамічних систем із критичними обмеженнями [23]. У роботі цей підхід адаптовано до сервісного рівня ІСМП, де стан сервісу визначається сукупністю ресурсних і часових характеристик та поточним рівнем виконання сервісної функції.

Нехай ІСМП реалізує множину сервісів:

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}, \quad (1)$$

де $S_c \subseteq S$ – підмножина критичних сервісів.

Для кожного сервісу s_i визначається вектор стану:

$$\bar{x}_i(t) = \begin{bmatrix} r_i(t) \\ \tau_i(t) \\ q_i(t) \end{bmatrix}, \quad i = \overline{1, N}, \quad (2)$$

де $r_i(t)$ – нормований рівень ресурсного забезпечення сервісу в момент часу t , який характеризує частку ресурсу, доступного сервісу відносно його поточної потреби; $\tau_i(t)$ – залишковий час до переходу сервісу в критичну область за поточ-

ного режиму функціонування; $q_i(t)$ – нормований рівень виконання сервісної функції, що відображає ступінь виконання порогових вимог до показників QoS [24].

Вектор $\bar{x}_i(t)$ (2) задає мінімально достатній опис стану сервісу за ресурсною, часовою та функціональною компонентами.

Оскільки компоненти (2) мають різну смислову суть і різні масштаби варіювання, подальший аналіз виконується в нормованому просторі. Для цього вводиться перетворення:

$$\bar{z}_i(t) = D_i (\bar{x}_i(t) - \bar{x}_i^{\min}), \quad (3)$$

де D_i – діагональна матриця нормування:

$$D_i = \text{diag} \left(\frac{1}{r_i^{\max} - r_i^{\min}}, \frac{1}{\tau_i^{\max} - \tau_i^{\min}}, \frac{1}{q_i^{\max} - q_i^{\min}} \right), \quad (4)$$

де $\bar{x}_i^{\min}$ та $\bar{x}_i^{\max}$ – вектори нижніх та верхніх допустимих меж компонентів вектора стану $\bar{x}_i(t)$.

Після застосування перетворення (3) з матрицею нормування D_i (4) вектор $\bar{z}_i(t)$ відображає положення сервісу у безрозмірному просторі нормованих змінних стану.

Допустима область функціонування сервісу s_i визначається множиною:

$$K_i = \{\bar{z}_i \in \mathbb{R}^3 | h_i(\bar{z}_i) \geq 0\}, \quad (5)$$

де $h_i(\bar{z}_i)$ – бар'єрна функція живучості сервісу.

Далі бар'єрна функція задається квадратичною формою:

$$h_i(\bar{z}_i) = 1 - \bar{z}_i^T Q_i \bar{z}_i, \quad Q_i = Q_i^T > 0. \quad (6)$$

Матриця Q_i (6) визначає чутливість бар'єрної функції живучості сервісу до змін компонент нормованого стану та їх спільного впливу. За такого задання множина K_i (5) інтерпретується як еліпсоїдальна область допустимого функціонування у просторі нормованих змінних стану $\bar{z}_i$.

Відповідно до $h_i(\bar{z}_i(t))$ (6) сервіс перебуває:

- в допустимому стані, якщо $h_i(\bar{z}_i(t)) > 0$;
- в граничному стані, якщо $h_i(\bar{z}_i(t)) = 0$;
- в критичному стані, якщо $h_i(\bar{z}_i(t)) < 0$.

Ці умови задають формальний поділ простору станів на область допустимого функціонування, її межу та критичну область втрати функційної здатності.

Для подальшого аналізу застосовується еквівалентний скалярний показник, що безпосередньо відображає ступінь наближення сервісу до критичної області:

$$\psi_i(t) = \bar{z}_i^T(t) Q_i \bar{z}_i(t). \quad (7)$$

З урахуванням $h_i(\bar{z}_i(t))$ (6) показник $\psi_i(t)$ (7) пов'язаний з бар'єрною функцією співвідношенням:

$$h_i(\bar{z}_i(t)) = 1 - \psi_i(t). \quad (8)$$

Отже, умова припустимого функціонування сервісу набуває вигляду $\psi_i(t) < 1$, граничний стан визначається співвідношенням $\psi_i(t) = 1$, а критичний стан – нерівністю $\psi_i(t) > 1$.

Показник $\psi_i(t)$ (7) надалі розглядається як аналітична міра стану живучості сервісу. Його зростання відповідає зменшенню відстані до кордону допустимої області функціонування.

Для задач оперативного аналізу істотним є урахування напрямку зміни стану. З цією метою використовується оцінка інтенсивності зміни нормованого стану:

$$\dot{\bar{z}}_i(t) = \frac{d\bar{z}_i(t)}{dt}, \quad (9)$$

а для дискретного спостереження в моменти t_{k-1} і t_k використовується наближення:

$$\dot{\bar{z}}_i(t_k) = \frac{\bar{z}_i(t_k) - \bar{z}_i(t_{k-1})}{t_k - t_{k-1}}. \quad (10)$$

Тоді інтенсивність зміни показника живучості $\psi_i(t)$ (7) (похідна показника живучості за часом) визначається співвідношенням:

$$\dot{\psi}_i(t) = 2\bar{z}_i^T(t)Q_i\dot{\bar{z}}_i(t). \quad (11)$$

Величина $\dot{\psi}_i(t)$ (11) характеризує інтенсивність наближення стану сервісу до критичної області:

- якщо $\dot{\psi}_i(t) > 0$, то стан сервісу зміщується у бік кордону допустимої області функціонування;
- якщо $\dot{\psi}_i(t) < 0$, то стан сервісу зміщується у бік віддалення від кордону допустимої області функціонування.

На цій основі передкритичний режим функціонування сервісу визначається системою умов:

$$\psi_i(t) < 1, \quad \dot{\psi}_i(t) > \gamma_i, \quad (12)$$

де $\gamma_i > 0$ – порогове значення інтенсивності наближення стану сервісу до критичної області.

Умова (12) означає, що сервіс ще перебуває поза критичною областю, визначеною нерівністю $\psi_i(t) > 1$, однак динаміка його стану відповідає наближенню до неї з інтенсивністю, що перевищує допустиме порогове значення.

Отже, у межах запропонованої постановки стан живучості сервісу s_i описується сукупністю величин:

$$\Xi_i = \langle \bar{x}_i(t), \bar{z}_i(t), \psi_i(t), \dot{\psi}_i(t) \rangle. \quad (13)$$

Для розв'язання поставленої задачі пропонується метод оперативного аналізу живучості критичних сервісів у коротких інтервалах спостереження, коли для кожного сервісу доступні поточні значення змінних стану та їх прирости. Метод ґрунтується на сумісному оцінюванні трьох характеристик сервісу: положення поточ-

ного стану відносно кордону допустимої області функціонування, напрямку його зміни за $\dot{\psi}_i(t)$ (11) та локального часу досягнення цього кордону. Така побудова забезпечує одержання аналітичного результату у формі класифікації станів і ранжованого переліку сервісів за ступенем загрози втрати функційної здатності.

Особливістю методу є перехід від контролю умови $\psi_i(t) < 1$ до оцінювання локального вичерпання допустимої області. З цією метою використовується величина залишку допустимості $\Delta_i(t)$, яка є додатною в межах допустимої області, дорівнює нулю на її кордоні та набуває від'ємних значень після перетину цього кордону. На відміну від бар'єрної функції, величина $\Delta_i(t)$ безпосередньо інтерпретується як поточна відстань за показником стану до кордону втрати функційної здатності у просторі нормованих змінних стану.

Подальший аналіз базується на припущенні, що в короткому інтервалі спостереження стан сервісу може бути подано локально лінеаризованою траєкторією в околі точки $\bar{z}_i(t)$. За цього припущення локальний час досягнення кордону допустимої області функціонування оцінюється співвідношенням

$$T_i^{\varepsilon}(t) = \frac{\Delta_i(t)}{\dot{\psi}_i(t) + \varepsilon}, \quad \varepsilon > 0, \quad (14)$$

де ε – регулятор, який вводиться для усунення вирождення знаменника за малих значень $\dot{\psi}_i(t)$, обмеження впливу похибки дискретного оцінювання похідної та забезпечення числової стійкості обчислень.

У формулі (14) параметр ε має ту саму розмірність, що й $\dot{\psi}_i(t)$, та обирається як мала додатна величина, менша за пороговий рівень γ_i , щоб не змінювати порядок ранжування сервісів у передкритичному режимі. У реальних умовах ε доцільно задавати або як малу частку порогового значення γ_i , тобто $\varepsilon = \vartheta\gamma_i$, де $0 < \vartheta \ll 1$, або на основі оцінки похибки визначення $\dot{\psi}_i(t)$ за дискретними спостереженнями. За такого вибору параметр ε не впливає на змістовну інтерпретацію показника $T_i^{\varepsilon}(t)$ та виконує функцію регуляризації за малих значень $\dot{\psi}_i(t)$.

Формула (14) визначає оцінку часу, через який сервіс досягне кордону допустимої області функціонування, заданого співвідношенням $\psi_i(t) = 1$ за збереження поточного напрямку та інтенсивності зміни стану. Якщо $\dot{\psi}_i(t) \leq 0$ стан сервісу не наближається до критичної області, тому в подальшому аналізі приймається $T_i^{\varepsilon} = +\infty$.

Для оперативного аналізу використовується класифікація станів сервісів на три класи. Індекс класу сервісу s_i визначається правилом:

$$\kappa_i(t) = \begin{cases} 0, & \psi_i(t) < 1, \quad \dot{\psi}_i(t) \leq \gamma_i, \\ 1, & \psi_i(t) < 1, \quad \dot{\psi}_i(t) > \gamma_i, \\ 2, & \psi_i(t) \geq 1. \end{cases} \quad (15)$$

Клас $\kappa_i(t)=0$ відповідає допустимому режиму функціонування, для якого умова $\psi_i(t)<1$ виконується, а інтенсивність наближення стану до критичної області не перевищує порогового значення γ_i . Клас $\kappa_i(t)=1$ відповідає передкритичному режиму: сервіс ще перебуває в допустимій області, однак $\dot{\psi}_i(t)>\gamma_i$. Клас $\kappa_i(t)=2$ відповідає критичному режиму, та визначається умовою $\psi_i(t)\geq 1$. Класифікація (15) забезпечує відокремлення сервісів, для яких потрібне випереджальне керувальне втручання, від сервісів зі стабільним перебуванням у допустимій області.

Для встановлення пріоритету аналізу в межах класів $\kappa_i(t)=0$ та $\kappa_i(t)=1$ використовується індикатор наближення втрати функційної здатності:

$$\eta_i(t) = w_i \frac{\max\{0, \dot{\psi}_i(t) - \gamma_i\}}{\Delta_i(t) + \varepsilon}, \quad w_i > 0 \quad (16)$$

де w_i – ваговий коефіцієнт, що відображає функціональну значущість сервісу для ІСМП.

Індикатор (16) зростає за двох умов: коли сервіс наближається до кордону допустимої області функціонування, тобто $\Delta_i(t) \rightarrow 0$, та коли інтенсивність наближення його стану до критичної області перевищує порогове значення γ_i . За такого подання в одному показнику поєднуються поточне наближення сервісу до кордону критичної області та інтенсивність зміни його стану в цьому напрямі. Величина w_i дає змогу враховувати функціональну значущість сервісу для системи без зміни способу опису стану сервісу, заданого співвідношеннями (5)–(13).

На основі (15), (16) формується правило ранжування сервісів. Спочатку всі сервіси впорядковуються за класом $\kappa_i(t)$ у спадному порядку, тобто сервіси класу 2 мають найвищий пріоритет аналізу, сервіси класу 1 розташовуються після них, а сервіси класу 0 – наприкінці переліку. У середині кожного класу впорядкування здійснюється за спаданням значення $\eta_i(t)$. Отже, для двох сервісів s_i та s_j правило пріоритету має вигляд:

$$s_i \succ s_j \Leftrightarrow (\kappa_i(t) > \kappa_j(t)) \vee (\kappa_i(t) = \kappa_j(t) \wedge \eta_i(t) \geq \eta_j(t)), \quad (17)$$

Співвідношення (17) задає повний порядок сервісів за ступенем наближення до втрати функційної здатності в поточному інтервалі спостереження.

У процедурному поданні метод реалізується за такою послідовністю.

Крок 1. Для кожного критичного сервісу $s_i \in S_c$ використовуються поточні значення $r_i(t)$, $\tau_i(t)$, $q_i(t)$, формується вектор стану $\bar{x}_i(t)$ та виконується нормування згідно з (3), (4).

Крок 2. За нормованим станом $\bar{z}_i(t)$ обчислюється показник живучості $\psi_i(t)$ та визначається скалярна міра віддалення від кордону допустимої області $\Delta_i(t)$, яка є додатною в межах допустимої області, дорівнює нулю на її кордоні та набуває від’ємних значень після його перетину.

Крок 3. За двома сусідніми спостереженнями оцінюється $\dot{z}_i(t)$, після чого обчислюється інтенсивність зміни показника живучості $\dot{\psi}_i(t)$.

Крок 4. Для сервісу визначається клас стану $\kappa_i(t)$. Для сервісів, для яких $\dot{\psi}_i(t) > 0$ додатково оцінюється локальний час досягнення критичної кордону допустимої області функціонування $T_i^p(t)$. Якщо $\dot{\psi}_i(t) \leq 0$, то приймається $T_i^p(t) = +\infty$.

Крок 5. Для сервісів, що залишаються в допустимій області функціонування, обчислюється індикатор наближення до втрати функційної здатності $\eta_i(t)$.

Крок 6. На множині S_c формується ранжований перелік сервісів за правилом (17), який визначає поточну послідовність аналізу за ступенем наближення до втрати функційної здатності.

Перевага запропонованого методу полягає в тому, що його побудовано на локальних характеристиках стану сервісу без формування окремого сценарного прогнозу та без синтезу керувального впливу на етапі аналізу. У межах методу оцінюються поточний стан сервісу, його віддаленість від кордону допустимої області функціонування та інтенсивність наближення до цього кордону. У результаті формується аналітична основа, придатна для подальшого використання в контурі оперативного параметричного керування ресурсами, де ранжований перелік сервісів може визначати послідовність та глибину керувального впливу.

Експериментальну перевірку запропонованого методу виконано на серії імітаційних сценаріїв функціонування критичних сервісів ІСМП. Метою експерименту було оцінювання двох властивостей методу: здатності виявляти передкритичний режим до перетину кордону критичної області та здатності формувати вимірюваний часовий інтервал для підготовки керувальної реакції. У кожному сценарії для сервісів обчислювалися значення показника стану живучості $\psi_i(t)$ та інтенсивності його зміни $\dot{\psi}_i(t)$ відповідно до співвідношень (7), (11), а класифікація стану сервісу виконувалася за правилом (15). Далі фіксувалися два моменти часу: момент входу сервісу в передкритичний режим та момент досягнення кордону критичної області $\psi_i(t)=1$. Різниця між цими моментами розглядалася як часовий інтервал випереджального виявлення.

На рис. 1 наведено часові траєкторії показників $\psi_i(t)$ та $\dot{\psi}_i(t)$ для трьох умовних сервісів s_1 , s_2 , s_3 , що відрізняються інтенсивністю наближення стану до критичної області.

На рис. 1 а) подано траєкторію показника $\psi_i(t)$; суцільна горизонтальна лінія відповідає кордону допустимої області функціонування, заданому співвідношенням $\psi_i(t)=1$. На рис. 1 б) подано траєкторії $\dot{\psi}_i(t)$; штрихова горизонтальна лінія відповідає пороговому значенню γ_i , що визначає передкритичний режим за умовою (12). Крапкові вертикальні лінії фіксують моменти входу сервісів у передкритичний режим, а штрихова вертикальна лінія – момент досягнення сервісом s_2 кордону допустимої області функціонування.

Аналіз рис. 1 показує, що метод забезпечує виявлення передкритичного режиму до моменту досягнення кордону допустимої області функціонування. Для сервісу s_3 передкритичний режим фіксується раніше, ніж виконується умова $\psi_i(t)=1$, причому часовий інтервал між цими подіями є найбільшим серед розглянутих траєкторій. Це узгоджується з характером його динаміки: величина $\dot{\psi}_i(t)$ раніше перевищує порогове значення

γ_i та зберігає додатні значення протягом більшого інтервалу часу. Для сервісу s_2 передкритичний режим також виявляється завчасно, однак відповідний часовий інтервал є меншим, ніж для s_3 , що відповідає меншій інтенсивності наближення до критичної області. Для сервісу s_1 траєкторія $\psi_i(t)$ залишається в допустимій області функціонування, а після локального максимуму спостерігається зменшення показника, яке супроводжується переходом $\dot{\psi}_i(t)$ до від'ємних значень. У цьому випадку метод не формує помилкового віднесення сервісу до передкритичного режиму, оскільки такий режим оцінюється з урахуванням положення траєкторії відносно кордону допустимої області та напрямку зміни стану.

Одержаний результат має визначальне значення для практичного застосування методу. Показник $\psi_i(t)$ відображає поточне положення стану сервісу відносно кордону допустимої області функціонування, проте сам по собі не забезпечує достатньої інформації щодо інтенсивності наближення до критичної області. Включення до аналізу похідної $\dot{\psi}_i(t)$ дає змогу відокремити стійкі допустимі стани від режимів, у яких за умови $\psi_i(t) < 1$

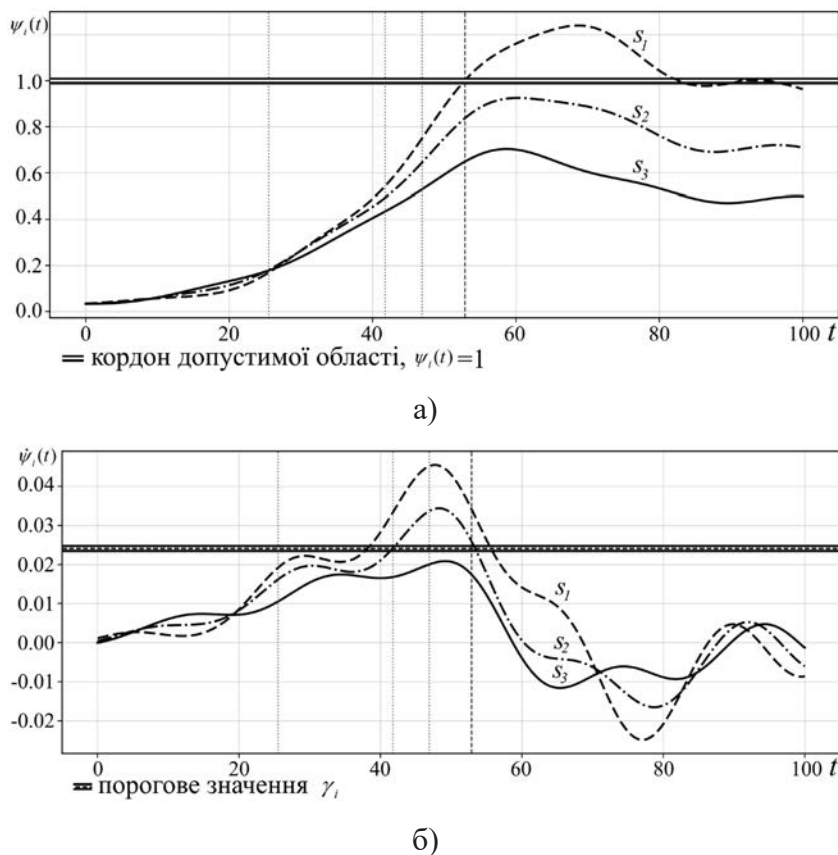


Рис. 1. Часові траєкторії показників стану живучості для трьох сервісів: а) траєкторія $\psi_i(t)$ відносно кордону допустимої області функціонування $\psi_i(t)=1$; б) траєкторія $\dot{\psi}_i(t)$ відносно порогового значення γ_i

вже сформовано динаміку наближення до втрати функційної здатності. Саме ця властивість надає методу випереджального характеру.

На рис. 2 наведено узагальнені результати серії сценаріїв для множини сервісів s_1-s_6 . Столпчиковою діаграмою показано середній часовий інтервал випереджального виявлення, тобто середню різницю між моментом фіксації передкритичного режиму та моментом досягнення кордону допустимої області функціонування. Лінійною діаграмою, віднесеною до другої осі ординат, показано середній момент досягнення критичного стану.

З рис. 2 видно, що для всіх розглянутих сервісів метод забезпечує додатний часовий інтервал випереджального виявлення, який перебуває в межах від 19.5 до 27.0 умовних одиниць часу. Найбільше значення отримано для сервісу s_1 , найменше – для сервісу s_6 , проте навіть у цьому випадку зберігається достатній інтервал часу для підготовки рішень у контурі оперативного параметричного керування ресурсами.

Розподіл значень на рис. 2 також має змістову інтерпретацію. Для сервісів, у яких передкритичний режим фіксується раніше відносно моменту досягнення критичного стану, часовий інтервал випереджального виявлення є більшим. Для сервісів, у яких перехід до критичного стану відбувається швидше, цей інтервал зменшується. Таким чином, рис. 2 підтверджує, що метод враховує не лише поточне положення стану відносно кордону допустимої області функціонування, а й інтенсив-

ність його зміни, що узгоджується з використанням показників $\Delta_i(t)$, $T_i^p(t)$, $\eta_i(t)$.

У контексті практичного використання результати рис. 1 та рис. 2 підтверджують дві визначальні властивості запропонованого методу. По-перше, метод забезпечує стає виявлення передкритичних режимів до моменту переходу стану сервісу в критичну область. По-друге, таке виявлення супроводжується вимірюваним випереджальним часовим інтервалом, придатним для використання в задачах випереджального перерозподілу ресурсів, зміни параметрів функціонування сервісу або підготовки відновлювального впливу. Завдяки цьому аналіз живучості сервісів набуває прикладного значення як окремий аналітичний модуль у складі засобів оперативного забезпечення живучості ІСМП.

Отже, обчислювальний експеримент підтвердив працездатність запропонованого методу в частині виявлення передкритичних режимів та формування випереджального часового інтервалу до втрати функційної здатності. Це дає підстави розглядати метод як придатний для вбудування в контур оперативного параметричного керування ресурсами, де результати ранжування сервісів та оцінювання часу досягнення критичного стану можуть використовуватися для визначення пріоритетів підтримки критичних функцій.

У прикладному аспекті запропонований метод доцільно віднести до бортових інформаційно-обчислювальних систем мобільних платформ,

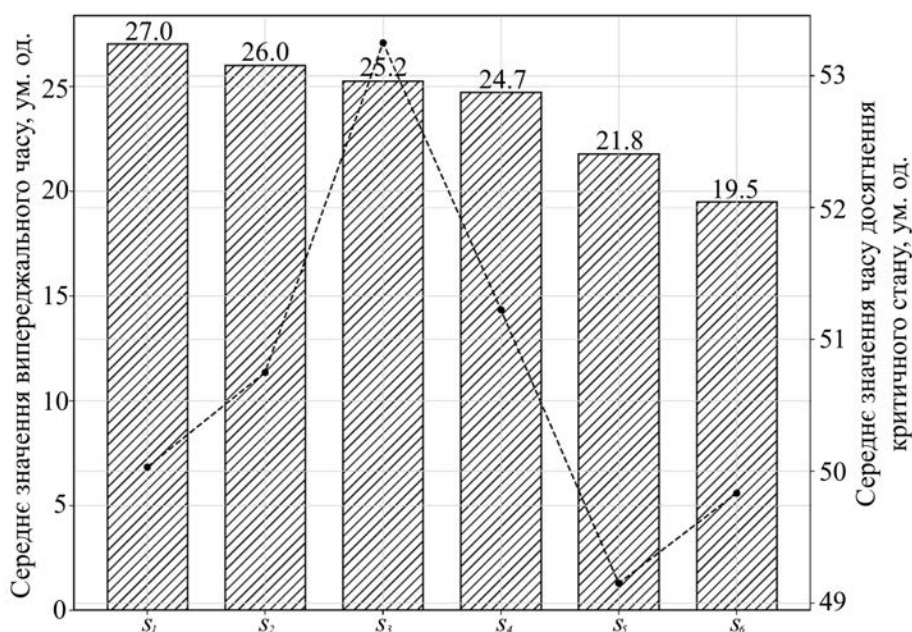


Рис. 2. Узагальнені результати серії сценаріїв для сервісів s_1-s_6

у яких одночасно функціонують кілька критичних сервісів із різною ресурсною інтенсивністю та різними часовими вимогами до збереження функційної здатності. Типовим прикладом є безекіпажна або робототехнічна платформа, на якій паралельно функціонують сервіси навігаційного оцінювання стану, стабілізації руху, злиття сенсорних даних, технічного зору, виявлення та супроводу об'єктів, передавання телеметрії, а також міжмодульної координації обчислень. У таких системах деградація має сервісний характер: критичний стан формується внаслідок вичерпання доступного процесорного часу, пам'яті, енергетичного ресурсу або пропускну здатності внутрішнього чи зовнішнього каналу обміну, причому втрата функційної здатності окремого сервісу настає раніше, ніж формується повна відмова мобільної платформи. Саме для цього класу систем показники, визначені в методі, мають безпосередній фізичний зміст:

- компонент $r_i(t)$ може інтерпретуватися як доступний обчислювальний або енергетичний ресурс ІСМП;

- компонент $\tau_i(t)$ – як залишковий допустимий час збереження функційної здатності сервісу до порушення функціональних вимог;

- компонент $q_i(t)$ – як узагальнений нормований показник рівня виконання сервісної задачі, наприклад точності оцінювання стану, достовірності розпізнавання, затримки видачі результату або частки втрачених даних.

За таких умов метод дає змогу перейти від загального спостереження за навантаженням платформи до локального аналізу сервісів, для яких поточний стан ще залишається допустимим, однак напрям його зміни вже вказує на швидке наближення до кордону критичної області.

Прикладна цінність методу в цій області визначається тим, що він спирається на величини, безпосередньо доступні в бортовій телеметрії та журналах виконання програмних модулів. Достатньо мати поточні оцінки доступного ресурсу, залишкового допустимого часу збереження функційної здатності сервісу та фактичного рівня виконання сервісної функції. Це робить метод відтворюваним у середовищі імітаційного моделювання

та на експериментальному стенді з реальним обчислювальним модулем мобільної платформи. Застосовність методу обґрунтовується тим, що в багатосервісних бортових системах саме сервіс є об'єктом аналізу, найближчим до цільової функції системи. Метод формує основу для завчасного виявлення наближення стану критичних сервісів до критичної області, що дає змогу своєчасно перейти до параметричного обмеження навантаження, зміни частоти обробки даних, перерозподілу обчислювального ресурсу або переходу до спрощеного режиму функціонування до моменту зриву основної місії ІСМП.

Висновки. У роботі розроблено метод аналізу живучості сервісів ІСМП за ресурсно-часовими змінними. Метод забезпечує оцінювання стану сервісу в нормованому просторі змінних стану, виявлення передкритичного режиму за сукупністю положення стану відносно кордону допустимої області функціонування та інтенсивності його зміни, а також ранжування сервісів для подальшого оперативного параметричного керування ресурсами. Формалізація через бар'єрну функцію, показник $\psi_i(t)$, його похідну $\dot{\psi}_i(t)$, класифікацію станів та правило пріоритету, на відміну від відомих підходів, дозволили змогу перейти від інтегрального спостереження за станом системи до аналітичного опису динаміки окремих критичних сервісів.

Результати обчислювального експерименту підтвердили працездатність методу та його прикладну придатність для багатосервісних бортових інформаційно-обчислювальних систем мобільних платформ. Показано, що метод забезпечує завчасне виявлення передкритичних режимів і формує випереджальний часовий інтервал до досягнення критичного стану, достатній для підготовки керувального впливу. Практична цінність одержаних результатів полягає у можливості використання методу як аналітичного модуля в контурах оперативного забезпечення живучості, де необхідно визначати пріоритети підтримки критичних функцій. Подальші дослідження доцільно спрямувати на врахування міжсервісних залежностей та інтеграцію одержаних оцінок у процедури адаптивного перерозподілу ресурсів у реальному часі.

Список літератури:

1. Ergenç, D., Memedi, A., Fischer, M., Dressler, F. Resilience in Edge Computing: Challenges and Concepts. *Foundations and Trends® in Networking*. 2025. Vol. 14, no. 4, 254–340. DOI: <https://doi.org/10.1561/13000000074>
2. Cassottana, B., Roomi, M. M., Mashima, D., Sansavini, G. Resilience analysis of cyber-physical systems: A review of models and methods. *Risk Analysis*. 2023. Vol. 43, no. 11, 2359–2379 DOI: <https://doi.org/10.1111/risa.14089>

3. Tkachov V., Ruban I. Integral survivability metric of an information system on a mobile platform under functional cascading and secondary failures. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2025. No. 4 (34), 78–100. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.4.078>
4. Ruban I., Tkachov V. Formalizing the Survivability Target Function of Information System on Mobile Platform. *International conference proceedings Computer and Information Systems and Technologies*. Kharkiv, 2025. P. 32–34. URL: <https://openarchive.nure.ua/entities/publication/c29c6715-1e49-4e8f-988c-ebab8b059edf>
5. Dodonov A., Lande D. Modeling the survivability of network structures. *CEUR Workshop Proceedings*. 2021. Vol. 2859, P. 1–10. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2859/paper1.pdf>
6. Cao Z., Zhao H., Wang Y., He C., Zhou D., Han X. A Resilience Quantitative Assessment Framework for Cyber-Physical Systems: Mathematical Modeling and Simulation. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, no. 15, article no. 8285. <https://doi.org/10.3390/app15158285>
7. Ruban I. V., Tkachov V. M. A method for synthesizing index policies to ensure the survivability of a mobile platform-based information system. *Applied Aspects of Information Technology*. 2025. Vol. 8, no. 4, 424–441. DOI: <https://doi.org/10.15276/aait.08.2025.27>
8. Zhou S., Ali A., Al-Fuqaha A., Omar M., Feng L. Robust Risk-Sensitive Task Offloading for Edge-Enabled Industrial Internet of Things. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. 2023. Vol. 70, no. 1, 1403–1413. DOI: <https://doi.org/10.1109/tce.2023.3323146>
9. Colarusso C., Falco I., Zimeo E. Business continuity of Cloud-based IoT applications through a seamless continuum. *Internet of Things*. 2025. Vol. 33, article no. 101723. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2025.101723>
10. Segovia-Ferreira M., Rubio-Hernan J., Cavalli A. R., Garcia-Alfaro J. A Survey on Cyber-Resilience Approaches for Cyber-Physical Systems. *ACM Computing Surveys*. 2024. Vol. 56, no. 8, article no. 202, 1–37. DOI: <https://doi.org/10.1145/3652953>
11. Fesenko H., Illiashenko O., Kharchenko V., Leichenko K., Sachenko A., Scislo L. Methods and Software Tools for Reliable Operation of Flying LiFi Networks in Destruction Conditions. *Sensors*. 2024. Vol. 24, no. 17, article no. 5707. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24175707>
12. Moskalenko V., Kharchenko V., Semenov S. Model and Method for Providing Resilience to Resource-Constrained AI-System. *Sensors*. 2024. Vol. 24, no. 18, article no. 5951. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24185951>
13. Amiri Z., Heidari A., Navimipour N. J., Unal M. Resilient and dependability management in distributed environments: a systematic and comprehensive literature review. *Cluster Computing*. 2023. № 26, 1565–1600. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10586-022-03738-5>
14. Batista A. d. S., Santos A. L. d. A Survey on Resilience in Information Sharing on Networks: Taxonomy and Applied Techniques. *ACM Computing Surveys*. 2024. Volume 56, Issue 12, article no. 302, 1–36. DOI: <https://doi.org/10.1145/3659944>
15. J. de la Croix Kiguigouleli Ki, Zerbo B., Soma M. Multi-Criteria Optimization for Service Placement and Migration in Collaborative Edge Computing. *Intelligent and Converged Networks*. 2025. Volume 6, Issue 4, pp. 278–288, DOI: <https://doi.org/10.23919/ICN.2025.0022>
16. Ismail A. A., Khalifa N. E., El-Khoribi R. A. A survey on resource scheduling approaches in multi-access edge computing environment: a deep reinforcement learning study. *Cluster Computing*. 2025. Vol. 28, article no. 184. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10586-024-04893-7>
17. Zhang Y., Zhao K., Yang Y., Zhou Z. Real-Time Service Migration in Edge Networks: A Survey. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, Vol. 14, no. 4, article no. 79. DOI: <https://doi.org/10.3390/jsan14040079>
18. Laroui M., Khedher H. I., Moun gla H., Afifi H. Service Function Chains multi-resource orchestration in Virtual Mobile Edge Computing. *Computer Networks*. 2023. Vol. 224, article no. 109582. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109582>
19. Feng K., Luo L., Xia Y., Luo B., He X., Li K., Zha Z., Xu B., Peng K. Optimizing Microservice Deployment in Edge Computing with Large Language Models: Integrating Retrieval Augmented Generation and Chain of Thought Techniques. *Symmetry*. 2024. Vol. 16, no. 11., article no. 1470. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym16111470>
20. Fu X., Wang Y., Yang Y., Postolache O. Analysis on cascading reliability of edge-assisted Internet of Things. *Reliability Engineering & System Safety*. 2022. Vol. 223, article no. 108463. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2022.108463>
21. Fu X., Zheng D., Liu X., Xing L., Peng R. Systematic review and future perspectives on cascading failures in Internet of Things: Modeling and optimization. *Reliability Engineering & System Safety*. 2024. Vol. 254, article no. 110582. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2024.110582>
22. Zhu L., Fu X., Liu X., Du S. Modeling and analysis of cascade failures in Industrial Internet of Things based on task decomposition and service communities. *Computers & Industrial Engineering*. 2025. Vol. 206, article no. 111177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.111177>
23. Ames A. D., Xu X., Grizzle J. W., Tabuada P. Control Barrier Function Based Quadratic Programs for Safety Critical Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2017. Vol. 62, no. 8, 3861–3876. DOI: <https://doi.org/10.1109/tac.2016.2638961>
24. Kasilov O. V., Dmytruk K. S. Model of Dynamic Load Balancing in A Swarm Network of Drones. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. 2025. Vol. 1, no. 4. P. 53–61. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.4.1/07>

Tkachov V.M., Ruban I.V. DEVELOPMENT OF A METHOD FOR ANALYZING THE SURVIVABILITY OF INFORMATION SYSTEM SERVICES ON A MOBILE PLATFORM BASED ON RESOURCE-TIME VARIABLES

This paper develops a method for analyzing the survivability of information system services on a mobile platform based on resource-time variables. The relevance of the study is determined by the fact that such systems operate under dynamically varying availability of computing, energy, and network resources, intermittent connectivity, partial observability of system state, and non-stationary external impacts, under which critical disruptions emerge at the level of individual services earlier than at the platform level as a whole. The aim of the study is to develop a method for formalized assessment of service states, detection of pre-critical operating modes, and ranking of services for operational parametric resource control. The method is based on adapting the approach of admissible state sets and barrier functions to the service level of the information system. The service state is represented by a vector of normalized variables including the level of resource provision, the residual admissible time for preserving functional capability, and the level of service function execution. A survivability state indicator, its time derivative, a rule for pre-critical mode detection, a three-level state classification, and a ranking rule for critical services are proposed. Experimental verification on a series of simulation scenarios has shown that the method provides early detection of service-state convergence to the critical region and forms an anticipatory time interval before the critical state is reached. The practical value of the results lies in the possibility of using the method as an analytical module in onboard multi-service information-computing systems of mobile platforms. The method relies on quantities available from onboard telemetry and software module execution logs, which ensures its reproducibility both in a simulation environment and on an experimental testbed. This makes the method suitable for short control cycles.

Keywords: service survivability, information system, resource-time variables, pre-critical mode, barrier function, parametric resource control, service ranking.

Дата першого надходження статті до видання: 21.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Філіппова М.В.

<https://orcid.org/0000-0003-4910-3249>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Богдан Г.А.

<https://orcid.org/0000-0001-6745-1509>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Демченко М.О.

<https://orcid.org/0000-0003-0436-1092>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ЕКСТРУЗІЇ ЕЛЕКТРИЧНОГО КАБЕЛЮ

У роботі проведено комплексне дослідження технологічного циклу виготовлення електричних кабелів з акцентом на етап нанесення ізоляційного покриття методом екструзії. Актуальність дослідження зумовлена високими вимогами до експлуатаційних характеристик сучасної кабельної продукції, таких як термічна стійкість, діелектрична міцність та опір зовнішнім чинникам. Встановлено, що ключовим фактором, який визначає якість готового виробу та стабільність геометричних параметрів ізоляції, є точність синхронізації швидкісних режимів приводних механізмів на різних ділянках лінії. В ході аналізу останніх публікацій виявлено, що існуючі підходи до автоматизації, зокрема з використанням штучних нейронних мереж та методів скінченних об'ємів, дозволяють прогнозувати параметри потоку полімеру, проте проблема динамічної затримки та зашумленості сигналів у контурах регулювання товщини шару залишається відкритою. Особливу увагу приділено ідентифікації критичних вузлів виробничої системи: приводам видачі, відводу та прийому (намотування). В роботі представлено розробку та опису функціональної моделі екструзійної лінії. Обґрунтовано необхідність контролю лінійної швидкості кабелю, оскільки будь-яка розсинхронізація між тяговим пристроєм та приймальною бобіною призводить до варіацій товщини ізоляції, що при високих швидкостях роботи лінії спричиняє значний обсяг браку. Наукова новизна роботи полягає у запропонованій схемі керування, яка базується на використанні прецизійних електроприводів змінного та постійного струму, охоплених єдиною системою регулювання. Математичне моделювання системи реалізовано в середовищі MATLAB Simulink. У роботі представлено порівняльний аналіз застосування класичного ПІД-регулятора та контролера на основі нечіткої логіки. Шляхом використання інструментарію Autotuning визначено оптимальні коефіцієнти пропорційного (K_p), інтегрального (K_i) та диференціального (K_d) посилення для контурів відводу та прийому. Результати моделювання підтвердили, що запропонована архітектура ПІД-регулятора забезпечує ефективну компенсацію збурень, викликаних зміною моменту навантаження при накопиченні ваги кабелю на бобіні. Система демонструє високу точність відстеження заданої швидкості (60 м/хв) та стабільність перехідних процесів. Впровадження розроблених алгоритмів керування дозволяє мінімізувати вплив людського фактора, підвищити продуктивність лінії та забезпечити рівномірність нанесення ізоляції відповідно до міжнародних стандартів якості.

Ключові слова: автоматизація, кабельна продукція, натяг дроту, ізоляція, система керування, ефективність, якість, технологічний процес, екструдер, контроль.

Постановка проблеми. Сучасне суспільство неможливо уявити без широкого використання електроенергії та електромагнітних хвиль. Їх генерація, передача й застосування безпосередньо пов'язані з використанням проводів і кабелів, які виконують роль ключових елементів систем передачі енергії та інформації.

Кабельна продукція виготовляється з матеріалів, стійких до впливу високих температур, електричних навантажень, вологи, масел та інших зовнішніх факторів. Конструктивно кабель являє собою один або декілька провідників (суцільних чи багатожильних), поєднаних між собою та, за

потреби, ізолюваних, що забезпечує передачу електричних або телекомунікаційних сигналів.

Забезпечення довговічності, надійності та високої якості кабельної продукції потребує застосування ефективних технологій виробництва та точного контролю ключових параметрів технологічного процесу. Саме контроль цих параметрів є критичним для отримання продукції, що відповідає сучасним вимогам якості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Якість виробництва кабелю в більшій частині залежить від операції нанесення ізоляції [1]. В роботі представлена математична модель, формальною частиною якої є матеріальний баланс, що описує кінетику реакцій зшивання полімеру навколо провідника. Також для зменшення витрат на виробництво кабельної продукції може застосовуватися мобільна лінія, яка виготовляє кабель безпосередньо перед тунелем, де укладають кабель [2]. Використовуються мобільні лінії, які безпосередньо виготовляють продукцію на місці прокладання кабелів, що зменшить затрати на виробництво, але має високу вартість.

При аналізі процесів, які відбуваються на стадії екструзії використовують моделі на основі нейромереж [3]. Будується модель штучної нейронної мережі для прогнозування параметрів процесу екструзії, яка може точно передбачити параметри процесу для різних марок кабелю. Це може скоротити терміни налаштування екструзійних ліній.

Також для покращення процесу виробництва кабелів проводять оптимізацію самої конструкції екструдера [4]. При цьому такі дослідження проводяться за допомогою моделювання потоку полімерних гранул вздовж твердого конвеєрного шнека з використанням чисельної моделі на основі методу кінцевого об'єму.

Для виробництва певних видів кабелів використовують нову концепцію процесу виробництва з використанням методології наукових досліджень дизайну [5]. Для даної методології розроблялось нове автоматизоване обладнання для виробництва кабелю Боудена. Використання такої системи призводить до скорочення тривалості циклу на 25% та підвищення продуктивності процесу на 30%.

При аналізі процесу виробництва кабельної продукції важливо ідентифікувати параметри процесу регулювання [6]. Одним з найбільш проблемних місць у виробництві є наявність в контурах регулювання товщини шарів ізоляції шумів вимірювання швидкостей черв'яків екструдерів і діаметрів шарів ізоляції, а також затримка часу. Зашумленість корисних сигналів і затримка часу

негативно впливають на точність контролю товщини шару і швидкість регулювання і можуть призвести до втрати стабільності системи.

Також важливим аспектом покращення процесу виробництва є використання більш якісних приводів [7]. Для цього розроблено конструкцію централізованого нелінійного контролера, заснованого на швидкому інтегральному терміналі керування ковзним режимом для гібридної мікромережі змінного/постійного струму

Щоб виконати завдання намотування дроту якнайшвидше, швидкість виробництва повинна бути відрегульована під час цієї операції [8]. Для вирішення проблеми контролю натягу для систем намотування використовують стратегію керування для фази прискорення за допомогою розширення Тейлора та зменшення коливань натягу. Однак, такий метод складний в реалізації [9].

Не дивлячись на велику кількість досліджень оптимізації процесу виготовлення кабельної продукції є актуальною та потребує побудови систему контролю швидкості подачу кабелю на ділянках відводу та прийому дроту при нанесенні ізоляції екструзійним методом.

Постановка завдання. Для забезпечення відповідності кабельної продукції сучасним вимогам якості необхідно детально дослідити умови перебігу технологічного процесу її виготовлення з урахуванням усіх впливових факторів і підпроцесів. На основі проведеного аналізу поставлено завдання розробити ефективну систему керування процесом екструзії, яка забезпечить підвищення якості готової продукції та зменшення рівня виробничого браку.

Виклад основного матеріалу У процесі виробництва електричних кабелів початковою технологічною операцією є волочіння дроту, в ході якого вихідні металеві заготовки значного діаметра послідовно протягуються через калібровані отвори, що дозволяє отримати провідники необхідних геометричних розмірів і характеристик. Наступним важливим етапом є відпал — термічна обробка, яка забезпечує зниження внутрішніх напружень у матеріалі, підвищення пластичності та покращення електропровідності провідників.

Після цього окремі дроти об'єднують у багатожильні провідники шляхом скручування або іншого способу з'єднання, що дозволяє сформувати необхідну конструкцію кабелю. На наступному етапі здійснюється нанесення ізоляційного покриття: провідники попередньо нагрівають і покривають полімерними матеріалами, такими як полівінілхлорид, поліетилен або зшитий поліе-

тилен. Це забезпечує електричну ізоляцію, захист від механічних пошкоджень і впливу зовнішніх факторів, а також підвищує експлуатаційну надійність кабельної продукції.

Етап нанесення ізоляційного покриття реалізується за допомогою процесу екструзії, під час якого на провідник наноситься рівномірний шар полімерного матеріалу. Така ізоляція забезпечує захист провідника від механічних пошкоджень, впливу зовнішнього середовища та сприяє зменшенню втрат матеріалу, зокрема міді.

Після завершення екструзії ізолюваний кабель проходить стадію охолодження в спеціальному жолобі, де стабілізуються його геометричні та фізичні параметри. Надалі здійснюється контроль якості: за допомогою вимірювальних пристроїв перевіряється відповідність діаметра кабелю заданим параметрам, а іскровий тестер використовується для виявлення можливих дефектів ізоляційного покриття.

На завершальному етапі кабель розрізають на стандартні довжини, намотують на котушки та готують до транспортування і реалізації. Функціональна схема технологічного процесу виготовлення електричного кабелю з відображенням екструзійної лінії наведена на рис. 3.1.

Технологічний процес розпочинається в екструдері, де металевий провідник (мідний або алюмінієвий) рівномірно покривається шаром розплавленого полімерного матеріалу методом екструзії. Після цього кабель потрапляє в нагріту частину труби, заповнену азотом під високим тиском 10 бар, де відбувається реакція зшивання за рахунок тепла, що передається від стінки труби випромінюванням і конвекцією. Ця частина труби розділена на шість незалежних теплових зон, а також перед охолоджуваною водою части-

ною є одна зона труби, заповнена азотом, який не нагрівається. Після цього кабель охолоджують до температури навколишнього середовища в два етапи. Спочатку в частині труби, охолодженої холодною водою, також під тиском 10 бар і, нарешті, після виходу з труби кабель охолоджується в навколишньому повітрі за допомогою стисненого повітря та вільної конвекції до кінця процесу на колесі намотування.

Для правильного проведення процесу необхідно ретельно вибирати багато параметрів виробничої лінії, а саме: швидкість лінії (регулює час перебування в трубі), температуру в нагрітій частині труби, заповненої азотом, температуру і швидкість потоку охолоджуючої води. Усі ці вимоги та обмеження є частиною комплексного виробництва силових кабелів, і виробники самостійно обирають ці значення.

На основі проведеного аналізу сформовано узагальнену модель керування процесом екструзії, що представлена на рис. 2.

Лінійна швидкість процесу екструзії характеризує швидкість переміщення кабелю вздовж виробничої лінії та визначає режим його витягування і намотування. Вона формується в результаті узгодженої роботи механізмів витягування та прийому, які забезпечують безперервний рух кабелю.

Основне регулювання швидкості здійснюється приводами видачі, відводу та прийому, причому її значення має залишатися стабільним для запобігання виникненню дефектів продукції. Для цього необхідна синхронна робота приводів із взаємним узгодженням їх швидкісних режимів, що дозволяє підтримувати постійну лінійну швидкість і забезпечувати рівномірність товщини ізоляційного покриття.

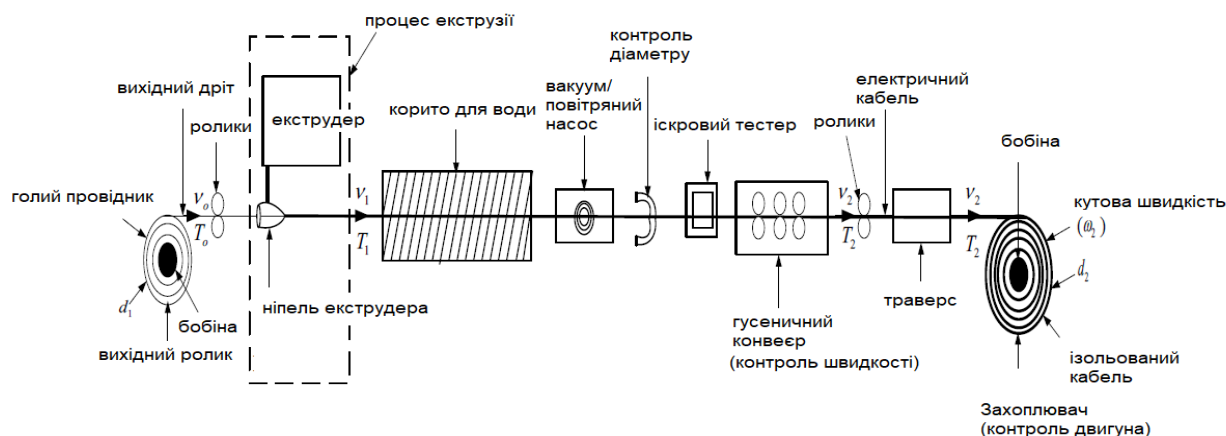


Рис. 1. Функціональна схема лінії екструзії електричного кабелю

З огляду на те, що екструзійні лінії часто працюють на високих швидкостях, навіть незначні відхилення параметрів можуть призвести до суттєвого зростання кількості браку. Тому ефективне керування швидкістю приводів є критично важливим для забезпечення стабільності технологічного процесу та отримання кабельної продукції високої якості.

Отже, ключовим параметром, що підлягає контролю, є лінійна швидкість переміщення дроту в екструзійній лінії. Її формування та підтримання забезпечуються трьома електроприводами: видачі, відводу та прийому. Привід видачі здійснює розмотування дроту з вихідної бобіни та подачу його до екструдера, привід відводу протягує дріт через зону екструзії та охолодження, а привід прийому відповідає за намотування готового кабелю на приймальну бобіну.

Для забезпечення стабільності технологічного процесу необхідно здійснювати безперервний контроль швидкості в режимі реального часу із застосуванням відповідних регуляторів, що підтримують узгоджену роботу всіх приводів.

У виробництві електричних кабелів зазвичай використовують електроприводи постійного

струму для ділянки відводу, тоді як на ділянках видачі та прийому застосовуються асинхронні двигуни. У деяких випадках також можуть використовуватися сервоприводи.

Регулювання швидкості таких приводів здійснюється шляхом зміни параметрів електродвигуна, зокрема опору якоря, магнітного потоку або напруги живлення.

Збільшення напруги або магнітного потоку призводить до підвищення швидкості обертання двигуна, тоді як збільшення опору, навпаки, зменшує швидкість як самого двигуна, так і руху кабелю по лінії.

Моделювання роботи системи здійснювалося з використанням пакету прикладних програм MATLAB Simulink. Було розроблено модель для електропривода постійного струму ділянки відводу та асинхронного привода ділянки прийому. У процесі дослідження застосовано регулятор із пропорційно-інтегрально-диференціальним (ПІД) законом керування, а також контролер на основі нечіткої логіки (рис. 3).

Для налаштування параметрів регуляторів для ліній прийому та відводу використовували утиліту MATLAB/Simulink/Autotuning. В результаті нала-

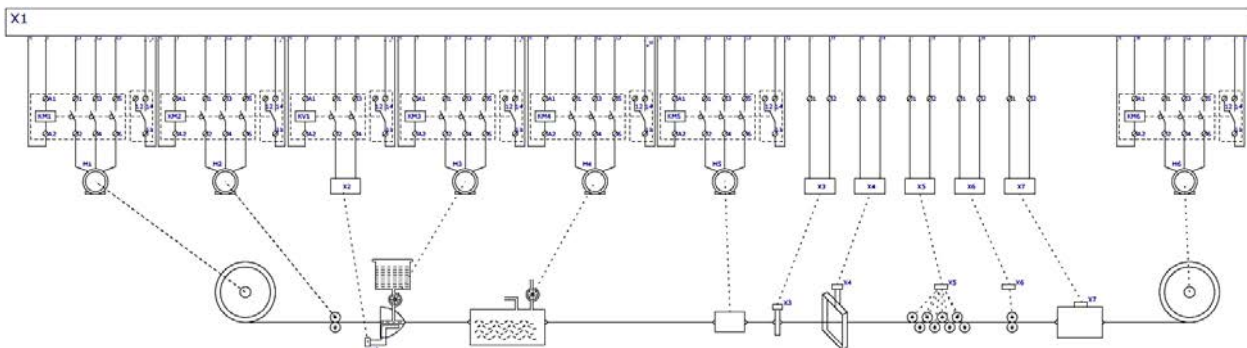


Рис. 2. Схема електрична принципова прототипу системи керування

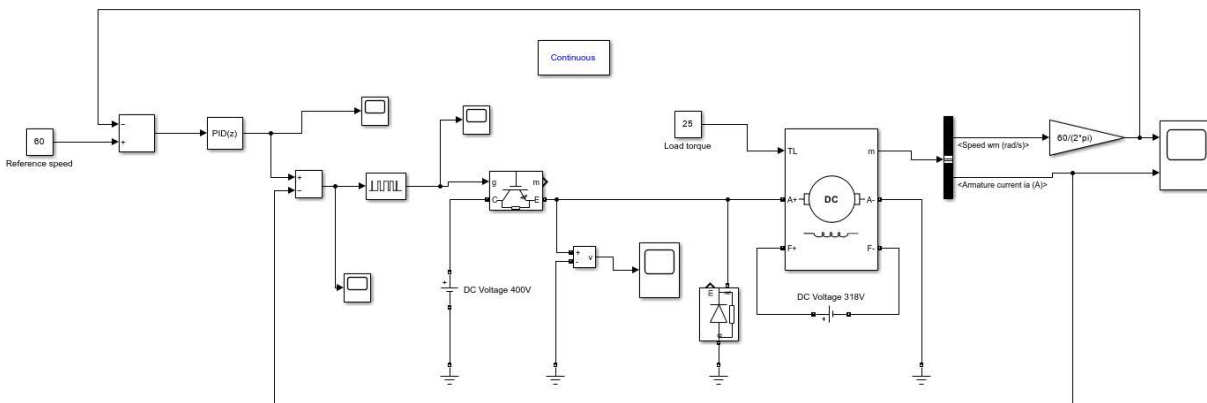


Рис. 3. Модель системи керування лінією відводу із застосуванням ПІД регулятора

Таблиця 1
Значення коефіцієнтів ПІД регуляторів для системи керування.

Вид системи	Параметри ПІД регулятора		
	K_p	K_i	K_d
Система відводу	54.00	324.32	2.23
Система прийому	24.00	58.40	2.47

штувань ПІД регуляторів приведені в таблиці 1, де параметри контролера включають пропорційне посилення (K_p), інтегральне посилення (K_i) і похідний диференціал (K_d).

Двигун постійного струму для витягування та серводвигун змінного струму для приймання були змодельовані окремо, але з такою ж заданою швидкістю 60 м/хв, що й швидкість екструзійної лінії, і тим самим крутним моментом навантаження 25 Нм, як навантаження всієї екструзійної лінії. Це пояснюється тим, що коли швидкість намотувального приводу падає через накопичення ваги на бобіні в результаті намотування кабелю на бобіну, контролер повинен забезпечити подачу більшого струму до натяжного двигуна, щоб збільшити крутний момент і привести двигун до необхідної або заданої швидкості, щоб підтримувати постійну швидкість лінії.

Висновки. Проведений аналіз технологічного процесу виготовлення електричних кабелів

підтвердив необхідність ефективного керування швидкістю та натягом дроту під час його проходження через екструдер, оскільки їхні відхилення можуть призводити до нерівномірності нанесення ізоляційного шару. Встановлено, що контроль лінійної швидкості кабелю є ключовим технічним завданням, від якого залежить підвищення продуктивності, покращення якості продукції та зменшення рівня браку. З урахуванням високих швидкостей виробництва навіть незначні похибки в регулюванні електроприводів можуть суттєво впливати на кінцеві характеристики виробу, що обумовлює необхідність синхронної роботи приводів для забезпечення стабільної товщини ізоляції.

У роботі запропоновано електричну принципову схему прототипу системи керування екструзійною лінією та розроблено модель системи керування ділянкою відводу із застосуванням ПІД-регулятора. Результати моделювання засвідчили, що ПІД-регулятор є ефективним інструментом забезпечення стабільної та точної швидкості роботи екструзійної лінії.

Крім того, проаналізовано можливості застосування контролера нечіткої логіки для автоматизованого регулювання параметрів технологічного процесу. Для обох підходів проведено моделювання в середовищі MATLAB/Simulink, що дозволило оцінити їх ефективність та перспективи впровадження у виробничих умовах.

Список літератури:

1. Kosar V., Gomzi Z. Modeling of the power cable production line. *Thermochimica Acta*. 2007. Vol. 457, no. 1-2. P. 70–82. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2007.02.020>.
2. Severengiz M., Sprenger T., Seliger G. Challenges and Approaches for a Continuous Cable Production. *Procedia CIRP*. 2016. Vol. 40. P. 18–23. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.040>.
3. Manohar B., Chinnapalaniandi P. Computational fluid dynamics simulation of single screw extruders in cable industries. 2016. Т. 05, № 03. С. 85–89.
4. Sousa V. F. C. et al. Developing a Novel Fully Automated Concept to Produce Bowden Cables for the Automotive Industry. *Machines*. 2022. Vol. 10, no. 5. P. 290. URL: <https://doi.org/10.3390/machines10050290>.
5. Ostroverkhov M., Silvestrov A., Kryvoboka G. Identification of the parameters of the cable production process. *Technology Audit and Production Reserves*. 2017. Vol. 5, no. 1(37). P. 29–34.
6. Armghan H. et al. Design of integral terminal sliding mode controller for the hybrid AC/DC microgrids involving renewables and energy storage systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020. Vol. 119. P. 105857. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.105857>.
7. X. Chu X. Nian, X. Fu. Tension Control of Web Winding Systems for Speed-up Phase. 39th Chinese Control Conference (CCC). Shenyang. China. 2020. p. 1756-1761. doi:10.23919/CCC50068.2020.9189375.
8. Оробчук Б., Сисак І., Бабюк С. Автоматизована система релейного захисту від замикань на землю. *Вісник ТНТУ*. 2012. Т. 66, № 2. С. 198–206.
9. Fadhe F. S., Noaman S. F. The Generalized Backstepping Control Method for Stabilizing and Solving Systems of Multiple Delay Differential Equations. *Al-Nahrain Journal of Science*. 2018. Vol. 00, no. 1. P. 150–156. URL: <https://doi.org/10.22401/anjs.00.1.20>.
10. Комп'ютерне моделювання процесів і систем. Методи оптимізації [Електронний ресурс] : підруч. для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-проф. прогн. «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» / С. П. Вислоух та ін. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 267 с.

Filippova M.V., Bohdan H.A., Demchenko M.O. CONTROL OF THE ELECTRICAL CABLE EXTRUSION PROCESS

This work presents a comprehensive study of the technological cycle of electrical cable manufacturing, with a specific focus on the insulation coating stage using the extrusion method. The relevance of this research is driven by the stringent requirements for the performance characteristics of modern cable products, such as thermal stability, dielectric strength, and resistance to environmental factors. It has been established that the key factor determining the quality of the finished product and the stability of the insulation's geometric parameters is the precision of speed mode synchronization across the various drive mechanisms of the production line. The analysis of recent publications reveals that existing automation approaches—particularly those utilizing artificial neural networks and finite volume methods—allow for the prediction of polymer flow parameters; however, the issues of dynamic delay and signal noise within the insulation layer thickness control loops remain unresolved. Particular attention is paid to identifying the critical nodes of the production system: the payoff (feed), haul-off (take-out), and take-up (winding) drives. The paper presents the development and description of a functional model of the extrusion line. The necessity of controlling the linear speed of the cable is substantiated, as any desynchronization between the haul-off device and the take-up bobbin leads to variations in insulation thickness, which results in significant scrap rates at high operating speeds. The scientific novelty of this work lies in the proposed control scheme based on high-precision AC and DC electric drives integrated into a unified regulation system. Mathematical modeling of the system was implemented using the MATLAB Simulink environment. The study provides a comparative analysis of the application of a classical PID controller and a fuzzy logic controller. By utilizing the Autotuning toolset, the optimal proportional (K_p), integral (K_i), and derivative (K_d) gain coefficients for the haul-off and take-up loops were determined. Simulation results confirmed that the proposed PID controller architecture provides effective compensation for disturbances caused by changes in load torque as the weight of the cable accumulates on the bobbin. The system demonstrates high precision in tracking the setpoint speed (60 m/min) and exhibits stability in transient processes. The implementation of the developed control algorithms allows for the minimization of human error, an increase in line productivity, and the ensuring of uniform insulation application in accordance with international quality standards.

Keywords: Automation, cable production, wire tension, insulation, control system, efficiency, quality, technological process, extruder, control.

Дата першого надходження статті до видання: 17.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 14.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Фуртат С.О.

<https://orcid.org/0000-0001-5534-9769>

Відокремлений структурний підрозділ «Київський фаховий коледж міського господарства;
Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського»

Фуртат О.В.

<https://orcid.org/0000-0001-8192-4026>

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Лялікова Ю.В.

<https://orcid.org/0009-0008-8525-833X>

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ОБРОБКИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ АВІАПЕРЕВЕЗЕНЬ

Розробка комп'ютерно-інтегрованої системи для автоматизації збору та обробки параметрів авіап перевезень є критично необхідним етапом для подальшого впровадження інтелектуальних методів управління. В умовах сучасного авіаційного ринку, а також з огляду на специфіку українських реалій, швидкість і точність обробки польотних даних стають визначальними факторами забезпечення безпеки та стійкості інфраструктури. Метою дослідження є встановлення перспективних напрямків розробки та впровадження автоматизованих систем, які забезпечують інтегровану обробку вхідних експлуатаційних даних, їх верифікацію та автоматичне формування аналітичної звітності щодо параметрів авіарейсів. На основі аналізу сучасних наукових джерел систематизовано перспективні напрямки оптимізації авіаційних операцій. Доведено, що сучасна наука переходить від статичних математичних моделей до динамічних систем. Установлено, що ефективність використання складного математичного апарату критично залежить від якості, верифікації та оперативності збору вхідних параметрів. Велика кількість розрізнених даних вимагає створення єдиного інформаційного простору для усунення «вузьких місць». Найбільш перспективним підходом визначено побудову архітектури, де інтелектуальні модулі інтегровані безпосередньо в контур управління повітряним рухом. Це дозволяє обробляти множинні джерела інформації в реальному часі, мінімізувати вплив «людського фактора», прогнозувати транспортні потоки та ефективно керувати розкладом вузлових аеропортів.. Використання виявлених закономірностей дозволяє спроектувати модулі збору та попередньої обробки даних згідно з жорсткими вимогами сучасних алгоритмів машинного навчання. Це є фундаментальною основою для розробки вискоєфективних систем підтримки прийняття рішень, які не лише автоматизують рутинні процеси, але й забезпечують предиктивний аналіз траєкторій польотів, комплексно підвищуючи ефективність галузі.

Ключові слова: автоматизація, параметри, експлуатація, технології, авіап перевезення, перспективи.

Постановка проблеми. В умовах сучасного авіаційного ринку швидкість та точність обробки польотних даних є критичними для виживання компанії. Велика кількість розрізнених параметрів (витрати пального, аеронавігаційні збори, технічний стан суден, логістика) потребує створення єдиного інформаційного простору. Використання комп'ютерно-інтегрованих підходів дозволяє автоматизувати рутинні операції, міні-

мізувати вплив «людського фактора» та забезпечити оперативне отримання техніко-економічних показників для прийняття управлінських рішень.

Сучасні вітчизняні та зарубіжні вчені активно обговорюють особливості експлуатації авіаційного транспорту як об'єкта автоматизації та дослідити принципи побудови автоматизованих робочих місць (АРМ) для критичної інфраструктури. Проте аналіз світового досвіду показує, що

сучасні тенденції автоматизації авіаперевезень, спрямовані на використання складного математичного апарату. Зокрема, сучасні дослідження підкреслюють трансформаційну роль штучного інтелекту в управлінні повітряним рухом, де ШІ використовується не лише для автоматизації рутинних завдань, а й для предиктивного аналізу транспортних потоків з метою уникнення заторів та затримок. Проте ефективність таких моделей критично залежить від якості та оперативності первинної обробки експлуатаційних даних. Саме тому розробка комп'ютерно-інтегрованої системи для автоматизації збору та обробки параметрів авіаперевезень є актуальним та необхідним етапом для подальшого впровадження інтелектуальних методів управління.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Аналіз останніх досліджень доводить, що питання автоматизації обробки експлуатаційних параметрів авіаперевезень широко висвітлені у науковій літературі. Дослідники приділяють значну увагу оптимізації наземної експлуатації в міжнародних аеропортах [2] та вивчають трансформаційну роль штучного інтелекту в сучасному управлінні повітряним рухом [3]. Окремий пласт робіт присвячено розробці моделей оптимізації розкладу вузлових аеропортів в умовах стохастичної невизначеності [4, 5, 9]. Сучасні фахівці детально розглядають перспективи застосування методів штучного інтелекту в повітряних операціях [8] та аналізують параметри систем трансферних авіаперевезень з використанням нечіткої логіки [6]. Водночас вітчизняні та зарубіжні автори акцентують на важливості впровадження інтелектуальних систем автоматизації для підвищення ефективності галузі [1, 10].

На особливу увагу заслуговує питання перспективних напрямків автоматизації обробки експлуатаційних параметрів авіаперевезень в сучасних українських реаліях. Умови воєнного стану диктують потребу в миттєвому реагуванні на критичні зміни в логістиці та забезпеченні максимальної точності прогнозування в умовах постійних ризиків. Автоматизація процесів обробки даних стає не просто інструментом ефективності, а критичним чинником забезпечення безпеки та стійкості авіаційної інфраструктури. Вочевидь, ця проблема залишиться стратегічно актуальною і в поствоєнний період, коли відновлення галузі та інтеграція в глобальний авіаційний простір вимагатимуть впровадження високотехнологічних рішень для оптимізації трафіку та мінімізації експлуатаційних витрат».

Постановка завдання. Метою проведеного дослідження є дослідження перспективних напрямків розробки та впровадження автоматизованих систем, які забезпечують інтегровану обробку вхідних експлуатаційних даних, їх верифікацію та автоматичне формування аналітичної звітності щодо параметрів авіарейсів.

Виклад основного матеріалу. Теоретичний аналіз даних науково-методичної та спеціальної літератури дозволив виявити пласт наукових робіт, дотичних до теми нашого дослідження. Зокрема, вчені вивчають можливості покращення наземної експлуатації аеропорту в міжнародних аеропортах, удосконалення контролю та управління пунктуальністю розкладу польотів [2, 9] та пропонують методи оптимізації експлуатації злітно-посадкових смуг [7, 10].

У роботі Е. Guzha [4] розглядається задача оптимізації функціонування авіаційного хабу (модель «hub & spoke») шляхом інтелектуального керування розкладом рейсів. Автор використовує апарат нечіткої логіки та теорії ймовірностей для врахування суб'єктивних факторів (комфорт пасажирів) та стохастичної природи наземного обслуговування. Поставлену задачу зведено до математичної моделі, де цільовою функцією є мінімізація втрачених доходів при дотриманні жорстких обмежень на ресурси наземних служб. При цьому джерелом вхідної інформації виступають виробничі бази даних аеропорту та експертні оцінки.

Аналогічний підхід використано і V. Romanenko [6], де задачу спільної оптимізації розкладів літаків і наземних операцій для аеропортів в умовах невизначеності автор пропонує розв'язати методом нечітких множин і ймовірісно-теоретичного моделювання.

Вивчаючи шляхи покращення пунктуальності вильоту повітряних суден у процесі розвороту, Wu, Cheng-Lung [2] наголошує, що поліпшення пунктуальності досягається через керування розкладом та моніторинг операційної ефективності наземних служб. За твердженням Gustaf Sölveling [4], використання стохастичного програмування дозволяє максимізувати пропускну здатність аеропорту навіть при суттєвих відхиленнях від графіку.

Вивчаючи шляхи оптимізації трафіку аеропортів та аналіз аеродромів, Zbakh, Douae [10] доводить необхідність віртуального симулювання процесів для підвищення безпеки та регулярності польотів. Автор акцентує увагу на тому, що у теперішній час найефективнішим підходом

є рішення, які можна тестувати та віртуально моделювати в інструментальних середовищах (зокрема Arena), що дозволяє мінімізувати ризики зіткнень та затримки.

У дисертаційному дослідженні Ahmed Khassiba [5] представлено чисельне дослідження проблеми планування прибуття літаків за умови невизначеності. Для вирішення піднятого питання автор запропонував модель у вигляді двоступеневі стохастичної задачі та розв'язав її шляхом декомпозиції Бендера.

Окремі автори [3] акцентують на тому, що в умовах стрімкого розвитку авіаційної галузі впровадження штучного інтелекту (ШІ) є перспективним напрямком її удосконалення: від проектування літаків і модернізації аеропортової інфраструктури до вдосконалення систем управління повітряним рухом (УПР). Зокрема, пропонується використовувати ШІ для оптимізації витрат палива, автоматизації рутинних завдань диспетчерів, аналізу великих масивів даних для прийняття рішень та прогнозування транспортних потоків з метою запобігання заторам. Хоча повна заміна авіадиспетчерів ШІ є складною через високу відповідальність та необхідність миттєвого людського судження, вчені обґрунтовують доцільність поступової інтеграції ШІ-технологій у конкретні операційні процеси, що дозволить значно підвищити рівень безпеки та загальну ефективність авіаперевезень. Запропонована авторами архітектура базується на інтеграції інтелектуальних модулів безпосередньо в контур управління повітряним рухом, що дозволяє системі в реальному часі корегувати траєкторії польотів на основі прогнозних моделей. Така схема забезпечує безперервний цикл збору даних від аеродромного та районного диспетчерських центрів для автоматизованої мінімізації затримок у зонах з високою інтенсивністю руху.

У межах системного огляду авіаційних операцій автори вказують на критичну роль машинного

навчання для прогнозування траєкторій польотів та оптимізації льотно-технічних характеристик повітряних суден [8]. Дослідники пропонують інтегрувати алгоритми штучного інтелекту в системи управління повітряним рухом для підвищення оперативної ефективності та безпеки, при цьому особлива увага приділяється вирішенню проблем варіативності даних. На основі аналізу понад 120 досліджень автори обґрунтовують, що впровадження інтелектуальних систем дозволяє не лише автоматизувати процеси, а й трансформувати підходи до обробки множинних джерел інформації в режимі реального часу, що є ключовим для подальшого розвитку галузі.

На основі проведеного аналізу науково-методичної літератури, основні підходи до автоматизації та оптимізації процесів в авіації систематизовано в наступній таблиці (табл. 1).

Як свідчать результати огляду, сучасна наука рухається від статичних математичних моделей до динамічних інтелектуальних систем, а саме:

- використання штучного інтелекту дозволяє трансформувати обробку множинних джерел інформації в режим реального часу;
- критичним фактором успіху є подолання варіативності даних через впровадження інтегрованих модулів безпосередньо в контур управління;
- прогнозування траєкторій та автоматизація звітності стають базовими елементами для підвищення безпеки польотів.

Висновки. Сучасний стан авіаційної галузі характеризується переходом від класичних математичних моделей до інтелектуальних систем на базі штучного інтелекту та машинного навчання. Це дозволяє не лише автоматизувати рутинні операції, а й здійснювати предиктивний аналіз траєкторій та транспортних потоків у реальному часі.

Ефективність складних моделей (нечіткої логіки, стохастичного програмування чи ШІ) критично залежить від якості, верифікації та опера-

Таблиця 1

Узагальнення напрямів оптимізації авіаційних операцій

Напрямок дослідження	Об'єкт оптимізації	Математичний апарат / Методи	Ключовий результат
Управління розкладом та хабами	Функціонування авіаційних вузлів (Hub & Spoke), пунктуальність	Нечітка логіка, теорія ймовірностей, стохастичне програмування	Мінімізація втрачених доходів та максимізація пропускну здатності
Наземне обслуговування	Процеси розвороту ПС, операції в аеропортах	Моніторинг операційної ефективності, імітаційне моделювання (Arena)	Підвищення регулярності польотів, безпека наземних операцій
Планування польотів (АТС/УПР)	Прибуття літаків, траєкторії руху в умовах невизначеності	Двоступеневі стохастичні задачі, декомпозиція Бендера	Оптимізація черг на прибуття та зниження затримок
Інтелектуальні системи (ШІ)	Управління повітряним рухом (УПР), проектування інфраструктури	Машинне навчання (ML), прогнозні моделі реального часу	Автоматизація рутинних завдань диспетчера, запобігання заторам

тивності збору вхідних параметрів авіарейсів. Саме цей етап є «вузьким місцем», яке потребує створення єдиного інформаційного простору.

Найбільш перспективним підходом є побудова архітектури, де інтелектуальні модулі інтегровані безпосередньо в контур управління повітряним рухом. Це забезпечує безперервний цикл збору

даних та їх автоматизовану обробку для прийняття управлінських рішень.

Використання виявлених закономірностей дозволить нам спроектувати модулі збору даних (Data Collection) та попередньої обробки (Preprocessing) таким чином, щоб вони відповідали вимогам сучасних ШІ-алгоритмів.

Список літератури:

1. Інтелектуальні системи автоматизації : монографія / О. Г. Аврунін та ін. Кременчук : НОВАБУК, 2021. 322 с.
2. Chen T., Hanaoka S. Improvement of Airport Surface Operation at Tokyo International Airport Using Optimization Approach. *Aerospace*. 2022. Vol. 9, No. 3. Art. 145. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace9030145>.
3. Nanban D. et al. Enhancing Air Traffic Management: The Transformative Role of Artificial Intelligence in Modern Air Traffic Control. *FMDb Transactions on Sustainable Intelligent Networks*. 2024. Vol. 1, No. 2. P. 72–84. DOI: <https://doi.org/10.69888/FTSIN.2024.000210>.
4. Guzha E., Romanenko V., Skorokhod M. Optimization model of the hub airport schedule under uncertainty. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 450. Art. 022023. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/450/2/022023>.
5. Khassiba A. Programmation stochastique à deux étapes pour l'ordonnancement des arrivées d'avions sous incertitude : diss. ... cand. techn. sciences : 2020. Toulouse : Université Paul Sabatier, 2020. 156 p.
6. Romanenko V. Optimization of transfer air transportation system parameters considering fuzzy and stochastic uncertainties. *Automation and Remote Control*. 2015. Vol. 76, No. 8. P. 1500–1514. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0005117915080135>.
7. Sölveling G. et al. Runway Operations Optimization in the Presence of Uncertainties. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 2010. Vol. 34, No. 2. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2010-9252>.
8. Tafur C. L. et al. Applications of artificial intelligence in air operations: A systematic review. *Results in Engineering*. 2025. Vol. 25. Art. 103742. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103742>.
9. Wu C.-L., Caves R. Flight schedule punctuality control and management: A stochastic approach. *Transportation Planning and Technology*. 2003. Vol. 26, No. 4. P. 313–330. DOI: <https://doi.org/10.1080/03081060310001635869>.
10. Zbakh D. et al. Airport traffic optimisation and airdrome analysis using mathematical modelling. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2023. Vol. 31, No. 3. P. 1744–1753. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v31.i3.pp1744-1753>.

Furtat S.O., Furtat O.V., Lialikova Yu.V. PROMISING DIRECTIONS FOR AUTOMATING THE PROCESSING OF AIR TRANSPORTATION OPERATIONAL PARAMETERS

The development of a computer-integrated system for automating the collection and processing of aviation parameters is a crucial step for the subsequent implementation of intelligent management methods. In today's aviation market, and considering the specific context of Ukrainian realities, the speed and accuracy of flight data processing are becoming decisive factors in ensuring infrastructure safety and resilience. The aim of the study is to identify promising directions for the development and implementation of automated systems that ensure the integrated processing of input operational data, their verification, and the automated generation of analytical reports on flight parameters. Based on an analysis of modern scientific sources, promising directions for the optimization of aviation operations have been systematized. It has been proven that modern science is shifting from static mathematical models to dynamic systems. It has been established that the effectiveness of using complex mathematical frameworks depends critically on the quality, verification, and promptness of input parameter collection. The vast amount of disparate data necessitates the creation of a unified information space to eliminate bottlenecks. The most promising approach is determined to be the development of an architecture where intelligent modules are integrated directly into the air traffic control loop. This allows for the real-time processing of multiple information sources, minimizing the "human factor," forecasting traffic flows, and efficiently managing hub airport schedules. Leveraging the identified patterns allows for the design of data collection and preprocessing modules that meet the strict requirements of modern machine learning algorithms. This forms a fundamental basis for developing highly efficient decision support systems that not only automate routine processes but also provide predictive analysis of flight trajectories, comprehensively enhancing the industry's efficiency.

Keywords: automation, parameters, operation, technologies, air transportation, prospects.

Дата першого надходження статті до видання: 12.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Shevchenko V.V.

<https://orcid.org/0009-0002-6485-4825>

National Technical University of Ukraine

"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Polushko M.M.

<https://orcid.org/0009-0001-2539-8938>

National Technical University of Ukraine

"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

AUTOMATED SYSTEM FOR DIAGNOSTICS OF THE PARTS PROCESSING

This work investigates the creation and implementation of an automated system for diagnosing the processing of parts, which is based on the use of methods for analyzing acoustic emission and elastic deformations. Its key task is to identify the degree of wear and predict the residual resource of the tool, which allows you to improve the quality of processing, reduce the number of scrap and optimize production processes. The system is implemented in a production environment, which helps to increase the efficiency of equipment operation and reduce the risk of emergency situations. The proposed algorithms provide the ability to quickly respond to changes in processing parameters and prevent tool failures. The system analyzes the received data in real time, which allows you to adjust processing modes, reducing the load on the equipment and increasing overall productivity. The use of machine learning and big data processing methods increases the accuracy of wear assessment and adaptation of technological parameters to changing operating conditions. Determining critical limit values allows you to avoid emergency situations and ensures stable operation of the equipment. The main advantage of the system is its integration with CNC systems, which makes it possible to automatically change processing modes without operator intervention. It also supports the use of cloud technologies for centralized storage and data analysis, which increases the accuracy and speed of decision-making. Data on the condition of the tool is used for statistical analysis of its efficiency and optimization of processing parameters. Studies have shown that the system helps to increase the tool life, reduce the number of scrap and reduce energy consumption. Reducing waste and improving the quality of finished products improves the economic efficiency of production. Further development may include the introduction of multi-sensor systems, digital twins and neural network algorithms for even more accurate prediction and adaptation of technological processes.

Keywords: automated system, diagnostics of the processing process, cutting tool, vibroacoustic signal, elastic deformations.

Formulation of the problem. In modern industrial production, the main priorities remain to increase productivity, reduce costs, and ensure high product quality. The intensive development of automated technologies and digital systems allows to significantly improve the efficiency of processing parts, optimize control processes, and minimize the risks of unexpected equipment failures. Automated processing process control systems are an integral part of modern production, providing continuous monitoring of processing parameters and prompt detection of deviations from normal operating modes [1, p. 3].

One of the most important elements of mechanical processing is the cutting tool, on which the quality

and accuracy of manufacturing parts largely depends. During operation, the cutting tool is subjected to significant mechanical stress, which leads to its wear, deformation, and gradual failure. Untimely detection of tool wear can lead to deterioration of processing quality, an increase in the percentage of defective products, and increased production costs. Traditional methods of controlling the performance of cutting tools are often ineffective due to their limited speed and insufficient accuracy.

The introduction of automated control systems for the processing of parts allows for timely determination of its wear, prediction of the residual resource and correction of processing modes. Such systems are

based on the analysis of various physical parameters, in particular acoustic emission, elastic deformations, temperature characteristics, etc. Analysis of these parameters in real time makes it possible to detect critical deviations and prevent emergency situations [2, p. 121].

Automated control systems contribute not only to increasing production productivity, but also to reducing the human factor in the decision-making process. For example, when detecting signs of increased tool wear, the system can automatically change cutting modes, reduce feed or rotation speed, which allows extending the tool life and ensuring stable product quality.

Another important aspect of automated control is integration with other production systems, in particular with control systems for CNC machines. Such integration allows for the creation of unified information environments in which data on the condition of the tool and processing parameters are constantly analyzed and used to improve technological processes. This contributes to the creation of the concept of "smart manufacturing" [3, p. 9], which involves the use of artificial intelligence, machine learning and IoT (Internet of Things) for automatic decision-making and adaptation of production processes to changing conditions.

The transition to "smart manufacturing" necessitates a shift from reactive maintenance to proactive, data-driven diagnostics. By leveraging the Industrial Internet of Things (IIoT), sensors can stream high-frequency data to edge computing units that process information locally, reducing latency in critical decision-making. This ecosystem allows for the synchronization of the digital twin with the physical machine, providing a sandbox for testing optimized cutting parameters without risking damage to the actual equipment.

The use of artificial intelligence and big data methods in control systems opens up new opportunities for predicting the condition of the tool and optimizing processing. For example, the use of machine learning algorithms allows you to analyze large data sets on processing parameters, identify patterns of tool wear and, based on this, adjust operating modes to minimize negative impacts [4, p. 257]. Such methods can significantly increase the reliability and accuracy of control, reduce losses due to premature tool retirement and ensure more efficient use of resources.

In addition, automated control systems for the processing of parts actively use augmented reality (AR) and digital twins technologies [5, p. 37]. A digital twin is a virtual copy of a physical object (for example, a machine tool or cutting tool), which

reflects its state and dynamics of changes in real time. This allows you to simulate the behavior of the system under different conditions, predict potential malfunctions and optimize operating modes without the need for real experiments. It is worth noting that automated control systems are also an important tool for flexible production. They allow you to quickly adapt to changes in the design of parts, introduce new processing technologies and ensure stable product quality even in small-batch and small-batch production [6, p. 409]. In addition, the ability to integrate such systems into cloud platforms allows you to store and process data on remote servers, which improves the speed of analysis and the efficiency of production process management.

Analysis of recent research and publications.

In the future, the development of automated control systems for the processing of parts will be aimed at increasing their speed, accuracy and adaptability to changing production conditions. In particular, an important direction is the development of multifunctional sensor systems that can simultaneously control several parameters (vibration, temperature, etc.) and perform a comprehensive analysis of tool wear [7, p. 5]. Additionally, the introduction of self-adaptive algorithms based on neural networks will allow control systems to independently change the analysis parameters depending on the operating conditions of the tool.

Task statement. The purpose of the work is: to develop an automated system for processing parts based on measuring acoustic emission and elastic deformations, which allows for timely detection of tool wear, predicting its residual resource and correcting technological processing modes.

To achieve this, the study focuses on the synergistic relationship between high-frequency acoustic signals and low-frequency mechanical strains. The integration of these two distinct physical phenomena provides a more holistic view of the tool-workpiece interface than single-sensor systems. Specifically, the research aims to validate a mathematical model that translates these raw physical inputs into a singular, actionable "wear index" that can be interpreted directly by CNC controllers.

Thus, the development and implementation of such systems is an important step towards the digitalization of production processes, increasing their flexibility and efficiency. The integration of automated control with modern technologies of artificial intelligence, machine learning and IoT allows to create high-tech systems that are able to work in dynamic conditions of modern production and provide continuous control of product quality. Automated control systems allow

to significantly reduce production losses, improve the forecasting of the technical condition of equipment and ensure high reliability of mechanical processing [8, p. 4]. As a result, enterprises are able to reduce costs for maintenance and repair of equipment, which in the long term contributes to increasing the competitiveness and efficiency of the entire production process.

Outline of the main material of the study. The cutting process is accompanied by a set of physico-chemical phenomena, in particular mechanical, electrical, thermal, adhesive and diffusion processes that occur during the interaction of the cutting tool with the workpiece. Each of these factors affects the processing parameters, which contain information about the cutting conditions. Determining the dependence between them and the degree of tool wear makes it possible to assess its condition and predict the residual service life.

The results of experimental studies confirm that the most informative characteristics for controlling the process of processing parts are the parameters of acoustic emission and elastic deformations [9, p. 16].

Therefore, the proposed control system should be based on the analysis of the signals of these processes. At the same time, the key diagnostic indicator is acoustic emission in the cutting zone, since it is formed under the influence of the main physico-mechanical phenomena and is a reliable indicator of the technical condition of the tool. That is why in the developed system, the assessment of its wear and adjustment of the technological process will be carried out on the basis of the received signals.

The automated machining control system contains two levels of diagnostics. The first provides prompt response and emergency stop in case of exceeding the permissible deformation limits. Sudden changes in the behavior of the material may indicate a critical level of wear, the presence of hard inclusions in the workpiece or a sharp increase in the depth of cut during roughing [10, p. 4]. One of the main reasons for an emergency stop may be a sudden tool failure. Analysis of changes in the characteristics of elastic deformations allows for timely identification of such cases and rapid response to them.

The second level performs the function of assessing the condition of the tool and predicting its further wear. This predictive level operates as a continuous monitoring loop that compares real-time data against a historical baseline of tool performance stored in the system's database. By utilizing a correction factor, the system accounts for variations in material hardness and tool geometry, ensuring that the diagnostic out-

put remains accurate even when switching between different production batches. This level is not merely observational; it serves as the "brain" of the adaptive control system, calculating the precise moment when a tool's efficiency drops below the economic threshold. It is based on the analysis of the combination parameter of acoustic emission [11, p. 13], which takes into account...

$$W_M = \frac{A^2 \cdot N_\Sigma}{K_\varepsilon} \quad (1)$$

where $A^2 \cdot N_\Sigma$ – acoustic emission power; A – acoustic emission signal amplitude; N_Σ – acoustic emission signal activity; K_ε – coefficient reflecting the influence of elastic deformations on the cutting process, can be described through the elastic modulus of the material and the conditions of interaction of the tool with the workpiece.

The values of the amplitude and activity of the acoustic emission signal are determined by analyzing the obtained acoustic emission signal data, and the elastic deformation parameter [12, p. 162] is calculated by the following formula:

$$K_\varepsilon = \frac{\sigma \cdot \varepsilon}{E} = \frac{F_c \cdot \Delta L}{A \cdot L \cdot E} \quad (2)$$

where E is the modulus of elasticity (Young's modulus); $\sigma = \frac{F_c}{A}$ is the stress, which is calculated as the cutting force (F_c) per unit area (A); $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$ is the relative strain, defined as the ratio of the change in length (ΔL) to the initial length (L).

Using the ratio of the combination parameter of acoustic emission W_M and the value of cutting tool wear, the degree of tool wear h_u is analyzed, the intensity of wear is calculated and mathematical models of wear are simulated. Based on these models, tool wear is predicted. After analyzing the degree of wear, intensity and previously predicted values, a conclusion is made about the possibility of making changes to the processing modes to reduce wear.

The mathematical model of cutting tool wear is described as follows:

$$h_u = \frac{\Delta h_u + (k_w \cdot j_u \cdot A^2 \cdot N_\Sigma)}{\frac{F_c \cdot \Delta L}{A \cdot E \cdot L}} = \frac{A \cdot (\Delta h_u + (k_w \cdot j_u \cdot A^2 \cdot N_\Sigma)) \cdot E \cdot L}{F_c \cdot \Delta L} \quad (3)$$

where Δh_u – existing wear, mm; j_u – wear intensity ($j_u = \frac{h_u(i)}{h_u(i-1)}$); k_w – correction factor for the ratio of tool wear and the combination parameter of acoustic emission, which is determined experimentally for various combinations of materials "tool – part" and entered into the database.

The calculation of the predicted wear of the cutting tool is carried out using the following formula:

$$h_{pr}(i+1) = (j_u \cdot \frac{h_u(i) + h_u(i-1)}{2}) \quad (4)$$

The general functional block diagram of the automated control system for the processing of parts is shown in Fig. 1, and the algorithm of its operation is presented in Fig. 2.

The control system consists of a sensor that measures the acoustic emission signal (pos. 1, Fig. 1). The received signal passes through an amplifier (pos. 2) and a low-pass filter (pos. 3), after which it is fed to an analog-to-digital converter (ADC, pos. 6). The signal that registers the elastic deformations of the cutting tool (pos. 4) is processed in a similar way: it is first amplified (pos. 5), and then transmitted to the ADC input.

Further analysis of the parameters is performed using a computer (pos. 12), which contains a unit for estimating the intensity and degree of wear (pos. 7). The unit for estimating wear functions by performing a fast Fourier transform (FFT) on the acoustic signals to isolate the frequency bands most associated with adhesive and abrasive wear. Simultaneously, the elastic deformation data is filtered to remove the "noise" of the machine's own structural vibrations, leaving only the pure strain data caused by the cutting force. This cleaned data is then fed into the mathematical models to generate a real-time prediction of the tool's flank wear (h_u). In this module, based on data on the maximum and minimum values of elastic deformations (pos. 8), emergency conditions are monitored. If the permissible limits are exceeded, the system sends an emergency stop signal to the actuators (pos. 15), which include the engine control unit, the feed control system and other modules.

In addition, in block 7, the intensity of wear of the cutting tool is analyzed using the correction factor k_w , which is stored in the database (pos. 9). For a

more accurate assessment, the operating modes of the technological and processing system are taken into account, information about which comes from the CNC block (pos. 13) according to the control program (pos. 14).

After determining the level of wear, the data is transmitted to block 10, where the machining process is simulated, the residual tool life is estimated and its further state is predicted based on information from the CNC. In block 11, corrective and control signals are generated that allow changing the machining modes, which are then transmitted to the CNC.

If the correction of technological parameters is impossible, the system initiates a stop of the production process or issues a command to replace the tool. The CNC, receiving the corresponding signals from block 11, makes changes to the control commands that are sent to the actuators (pos. 15).

Conclusions. Automated control systems for the processing of parts are an important element of modern production, as they can significantly increase the accuracy and stability of mechanical processing. The use of methods for analyzing acoustic emission and elastic deformations provides effective monitoring of the technical condition of the tool in real time. This allows for timely detection of signs of wear, prediction of residual life and prevention of emergency situations.

Integration of such systems with CNC, machine learning technologies and the Internet of Things contributes to the automatic correction of processing parameters, minimizing the human factor. By reducing the reliance on operator intuition, the system ensures a standardized level of quality that is independent of the workforce's experience level. The ability to automatically adjust feed rates and spindle speeds in response to tool degradation effectively extends the "sweet spot" of the tool's lifecycle, maximizing the

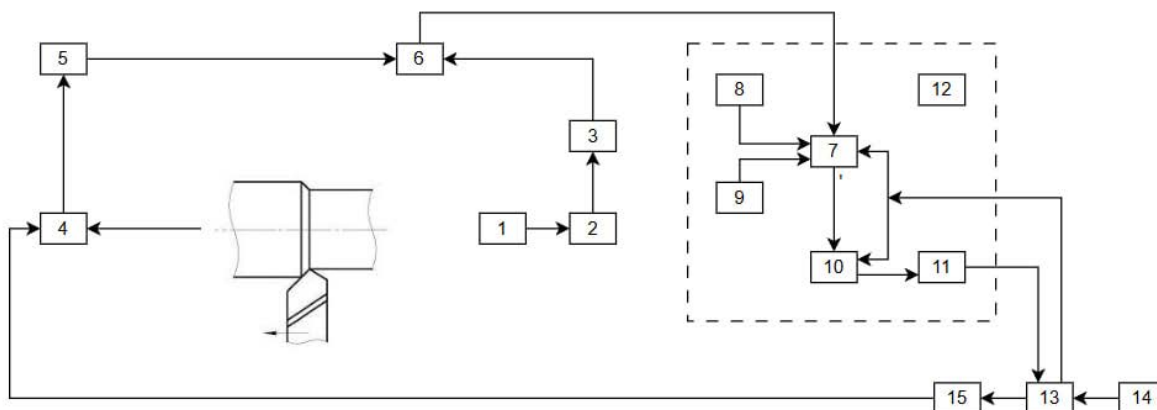


Fig. 1. Block diagram of an automated control system for the processing of parts

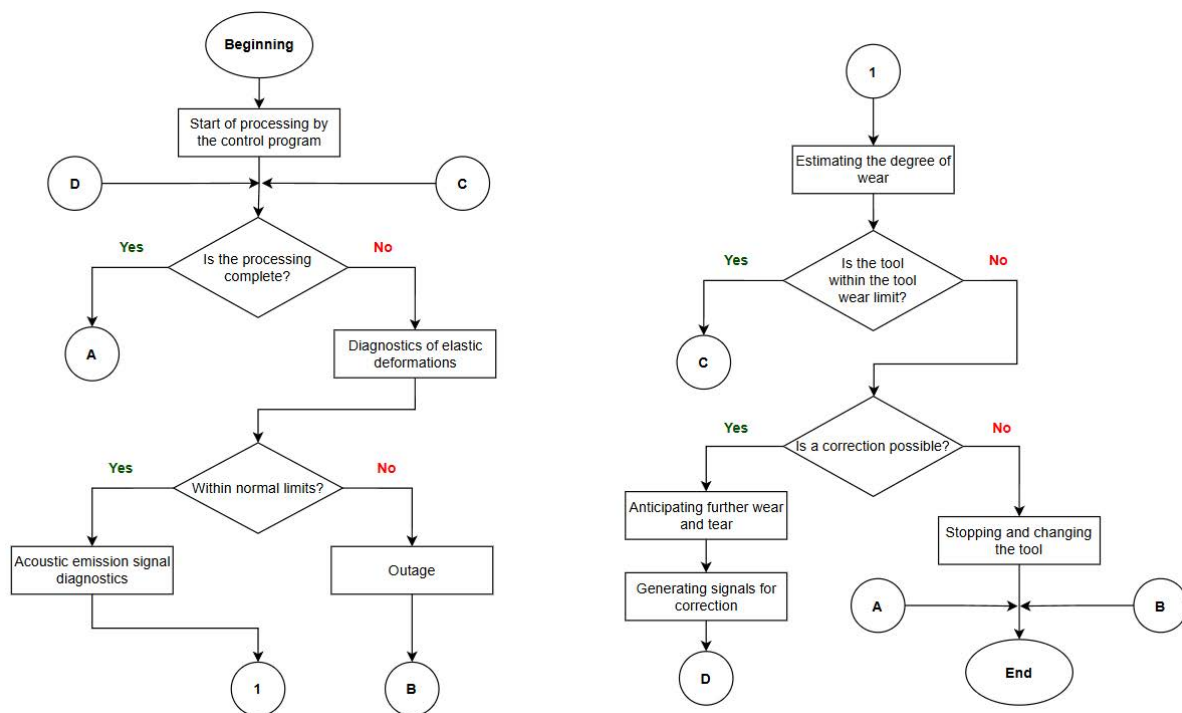


Fig. 2. Algorithm of functioning of the automated control system for the processing of parts

volume of material removed before a replacement is required. This leads to a measurable decrease in the cost-per-part and a significant reduction in the environmental footprint of the manufacturing process due to lower energy and material waste. This, in turn, helps to reduce production costs, optimize tool use and increase the overall efficiency of equipment.

Further development of such systems may include the introduction of self-learning algorithms, digital twins and cloud technologies for centralized data analysis. All this will contribute to increasing the reliability of production processes, reducing the level of defects and creating more flexible and adaptive technological solutions in industry.

Bibliography:

1. Shevchenko V. Details Processing Control System at the Automated Manufacturing. Advanced System Development Technologies I. *Studies in Systems, Decision and Control*. 2024.vol 511. pp 345–380. DOI:10.1007/978-3-031-44347-3_10
2. Shen Z.-A., Cheng J., Tang C.-T., Lin C.-F. Real-time Estimation of Machine Cutting Tool Wear. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*. 2022. Vol. 45, No. 2. pp. 117–130. DOI: 10.1080/02533839.2021.2012526
3. Benosman M. Learning-Based Adaptive Control: An Extremum Seeking Approach – Theory and Applications. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016. 18 p.
4. Groover M.P. Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing : Global Edition. Harlow : Pearson Education Ltd., 2016. 809 p.
5. Oduola O. M., Ikutegebe C. A., Akinluwade K. Cutting Tool Materials and Wear Mechanisms in Metal Cutting: Toughness, hot hardness and wear resistance constitute the prime properties for cutting tool materials in manufacturing. *LAP LAMBERT Academic Publishing*, 2016. 68 p.
6. Stephenson D.A., Agapiou J.S. Metal Cutting Theory and Practice: 3rd ed. / D.A. Stephenson, J.S. Agapiou. Boca Raton, FL: CRC Press, 2016. 969 p.
7. Srinivasan R., Lee Y.-T.T., Kamarthi S. Estimation of Online Tool Wear in Turning Processes Using Recurrence Quantification Analysis. Kamarthi. 2025. DOI: 10.18434/T924678.
8. Tröber P., Welm M., Weiss H.A., Demmel P., Golle R., Volk W. Temperature, thermoelectric current and adhesion formation during deep drawing. Demmel, R. Golle, W. Volk. *Wear*. 2021. Vol. 477. Art. 203839. DOI: 10.1016/j.wear.2021.203839.
9. Matvienko S., Shevchenko V., Tereshchenko M., Kravchenko A., Ivanenko R. Determination of composition based on thermal conductivity by thermistor direct heating method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 31 p.

10. V. Tsapenko, M. Tereshchenko, G. Tymchik, S. Matvienko, V. Shevchenko. Analysis of Dynamic Load on Human Foot. 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2020, 5 p.
11. Castiñeira-Ibáñez S., Tarrazó-Serrano D., Rubio C. Acoustic and Ultrasonic Sensing Technology in Non-Destructive Testing. *Sensors*. Basel : MDPI, 2025. Vol. 25, No. 11. Art. 3271. DOI: 10.3390/s25113271
12. Huebschen G., Altpeter I., Tschuncky R., Herrmann H. Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods. Cambridge: Woodhead Publishing, 2016. 320 p.

Шевченко В.В., Полушко М.М. АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ДІАГНОСТИКИ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ

У цій роботі досліджується створення та впровадження автоматизованої системи діагностики процесу обробки деталей, яка базується на використанні методів аналізу акустичної емісії та пружних деформацій. Її ключовим завданням є виявлення ступеня зношування та прогнозування залишкового ресурсу інструменту, що дає змогу підвищити якість обробки, зменшити кількість браку та оптимізувати виробничі процеси. Система впроваджується у виробниче середовище, що сприяє підвищенню ефективності функціонування обладнання та зниженню ризику виникнення аварійних ситуацій. Запропоновані алгоритми забезпечують можливість швидкого реагування на зміну параметрів обробки та запобігання відмовам інструменту. Система виконує аналіз отриманих даних у режимі реального часу, що дозволяє коригувати режими обробки, знижуючи навантаження на обладнання та підвищуючи загальну продуктивність. Застосування методів машинного навчання та обробки великих даних підвищує точність оцінки зношування та адаптацію технологічних параметрів до змінних умов експлуатації. Визначення критичних граничних значень дозволяє уникати аварійних ситуацій та забезпечує стабільну роботу обладнання. Основною перевагою системи є її інтеграція з системами ЧПК, що дає можливість автоматично змінювати режими обробки без втручання оператора. Також вона підтримує використання хмарних технологій для централізованого зберігання й аналізу даних, що підвищує точність і швидкість прийняття рішень. Дані про стан інструменту застосовуються для статистичного аналізу його ефективності та оптимізації параметрів обробки. Проведені дослідження показали, що система сприяє збільшенню ресурсу інструменту, зниженню кількості браку та зменшенню енергоспоживання. Скорочення відходів і підвищення якості готової продукції покращує економічну ефективність виробництва. Подальший розвиток може передбачати впровадження мультисенсорних систем, цифрових двійників та нейромережових алгоритмів для ще більш точного прогнозування і адаптації технологічних процесів.

Ключові слова: автоматизована система, діагностика процесу обробки, різальний інструмент, віброакустичний сигнал, пружні деформації.

Дата першого надходження статті до видання: 22.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Штіфзон О.Й.

<https://orcid.org/0000-0003-0011-4617>

Національний технічний університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Юдін О.С.

<https://orcid.org/0009-0007-6016-5631>

Національний технічний університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ МІКРОКЛІМАТОМ СКЛАДСЬКИХ ПРИМІЩЕНЬ ДЕРЕВООБРОБНОГО ПІДПРИЄМСТВА З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

У статті розглянуто систему регулювання параметрів мікроклімату складського приміщення деревообробного підприємства з застосуванням нечіткої логіки. Було визначено вимоги до приміщень складського типу на основі вимог до зберігання готової продукції. Об'єктом управління була установка припливно-витяжної вентиляція з секцією підтримання параметрів мікроклімату (нагрів, охолодження, зволоження). Розглянута проблематика та вимоги регулювання параметрів мікроклімату, зокрема температури, в умовах нестаціонарності та за наявності додаткових зовнішніх збурень. Проаналізовано структури систем автоматичного регулювання які традиційно використовують для вирішення подібних проблем. Показано практичну неможливість побудови системи з урахуванням всіх факторів впливу в межах традиційного підходу для проектування подібних систем. Запропоновано рішення, що дозволяє врахувати зовнішні збурення та взаємозв'язок параметрів мікроклімату на основі алгоритмів нечіткої логіки. На етапі синтезу нечіткої системи регулювання було повноцінно оглянуто функціональну схему автоматизації системою припливно-витяжної вентиляції. Проведено моделювання роботи системи з нечітким регулятором в умовах одночасної дії кількох зовнішніх збурень. Розраховано налаштування регулятора традиційної системи автоматичного регулювання з пропорційно-інтегральним (ПІ) регулятором методом розширених амплітудно-фазових характеристик. Порівняно роботу системи з нечітким регулятором з традиційною системою регулювання на основі ПІ-регулятора. На основі моделювання, показано переваги системи з нечітким регулятором над системою з ПІ – регулятором, як з точки зору якості регулювання, так і з точки зору гнучкості роботи. Доведено працездатність системи з нечітким регулятором в умовах комбінованого впливу зовнішніх збурень. Запропоновано простий та зручний спосіб налаштування системи з нечітким регулятором з мінімальним набором правил.

Ключові слова: нечітка логіка, функція приналежності, зовнішні збурення, моделювання, показники якості.

Постановка проблеми. Системи вентиляції та мікроклімату відіграють ключову роль на будь-якому підприємстві незалежно від сфери його діяльності. У деревообробній промисловості дані системи використовуються не лише для забезпечення здорових умов праці для персоналу, а і для збереження самого продукту після обробки та, навіть, вихідної сировини. Оскільки в даній галузі переважають багатосекційні приміщення, які поєднані між собою для безпечного та ефективного транспортування матеріалів між вироб-

ничими та обробними установками, регулювання параметрів повітря та мікроклімату цих приміщень стає досить складною задачею. Зазвичай, кількість персоналу в таких приміщеннях є обмеженою, тому пріоритетом в першу чергу є підтримання параметрів мікроклімату відповідно до вимог та технології зберігання продукції. Непостійні температури та вологість напряму впливають на фізичні параметри деревини та можуть не тільки ускладнити процеси обробки та сортування пиломатеріалів, а і зіпсувати цілі партії фінальної

продукції. В свою чергу, перевищення швидкості повітря може призвести до появи дефектів на деревині внаслідок пересушення верхніх шарів, появи градієнтів вологості та напружень.

Системи вентиляції складських приміщень поділяються на кілька основних типів, залежно від завдання та принципів функціонування:

- Припливні системи – системи, що забезпечують приміщення свіжим повітрям та допомагають підтримувати параметри мікроклімату. Мають фільтри для очищення припливного повітря та, зазвичай, секції нагріву. Вони використовуються для малих приміщень з невисокими вимогами до регулювання, тому і не мають додаткових секцій (охолодження, зволоження). Схема подібної системи наведена на рисунку 1.

- Витяжні системи – системи, що в першу чергу усувають забруднення та виключають можливість різкого підвищення вологості завдяки видаленню нагрітого та забрудненого повітря. Якщо система працює окремо (без припливної частини), то припливне повітря надходить ззовні, або з суміжних приміщень. Такі системи

не потребують додаткових секцій регулювання. Схема подібної системи наведена на рисунку 2.

- Припливно-витяжні системи – системи, що поєднують функціонали припливних та витяжних. Вимоги та складність таких систем є найвищими, оскільки в них вже використовуються секції зволоження, охолодження, нагріву та автоматично регулюється швидкість повітрообміну. Додатково в таких системах можуть використовуватись рециркуляція (за умови низького забруднення) та рекуперація для підвищення енергоефективності. Приклад подібної системи наведено на рисунку 3.

Основними вимогами до таких систем є :

1. Ефективний повітрообмін;
2. Виключення імовірності появи конденсатів;
3. Підтримка оптимальних температурних режимів;
4. Очистка повітря;
5. Енергоефективність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Зазвичай для регулювання контрольних параметрів мікроклімату використовують одноконтурні, або каскадні системи регулювання. Вибір зале-

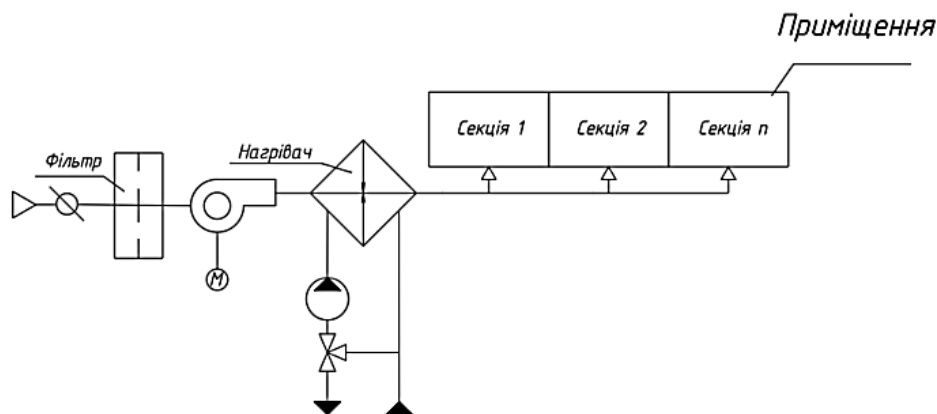


Рис. 1. Схема припливної системи

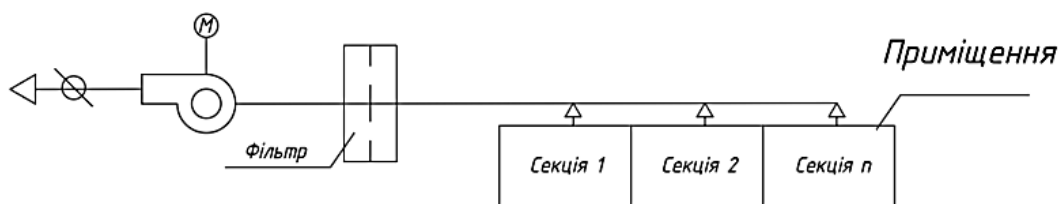


Рис. 2. Схема витяжної системи

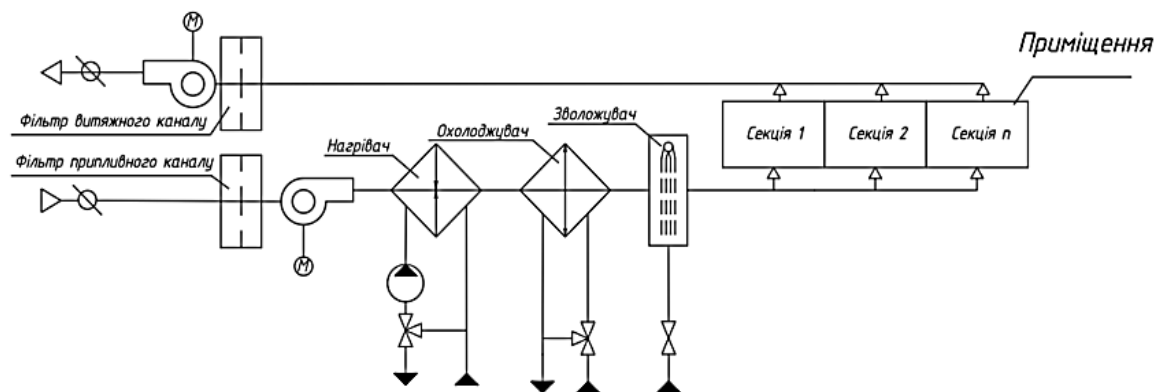


Рис. 3. Схема припливно-витяжної системи

жить від площі (об'єму) приміщення та вимог до точності регулювання. Проте класичні системи мають одну спільну проблему – дрейф параметрів. Це явище, за якого поступово змінюються параметри об'єкта управління під дією постійних зовнішніх факторів: відбувається рух об'єкта в просторі станів [1]. Наприклад, до дрейфу призводить зміна параметрів повітря (погодна, чи через зміну сезону), при цьому, додатково, можуть змінюватись характеристики самого приміщення. Додаткова складність полягає ще і в тому, що оптимальні параметри повинні досягатись при обмеженні швидкості руху повітря, оскільки її збільшення може призвести до пересушення пиломатеріалів (навіть після етапу сушки) і спричинити дефекти на деревині, псуючи готову продукцію.

Враховуючи все вищевикладене, нелінійність, нестаціонарність та розподіленість параметрів, постає питання застосування альтернативних методів регулювання, одним з яких і є нечітка логіка [2]. Саме використання нечіткого регулятора, який не потребує для свого налаштування точної інформації про математичну модель об'єкту керування (яку в зазначених випадках майже неможливо отримати) є найбільш перспективним способом побудови систем автоматичного регулювання для подібних об'єктів.

Проте, слід зазначити, що використання нечітких регуляторів має свої обмеження. Наприклад, розробка бази правил може бути трудомістким процесом, особливо для складних систем, а ефективність системи сильно залежить від точності, якості та повноти бази правил.

Загалом, поточний стан деревообробної галузі знаходиться на досить низькому рівні і причина цього полягає не лише у відсутності автоматиза-

ції процесів обробки та сортування, відсутності інноваційних рішень та підходів до рішення задач галузі в країні чи, навіть, війни, а і тому, що більшість сировини після мінімальної обробки одразу іде на експорт, а запасання деревиною на підприємствах не є пріоритетом (Україна до війни посідала 27 місце за обсягами експорту деревини та продукції з неї [3]). При цьому фактична лісистість України (16,72%) не відповідає оптимальній (20%) [4], що означає, що відсоток територій, що вкриті лісом для забезпечення максимальної екологічної, ґрунтової та кліматичної стабільності, а також для забезпечення лісових ресурсів, не досягається. Проблемою також є і падіння якості деревини, що спричинене приростом попиту та переорієнтацією на продуктивність, а не на якість, що породжує труднощі для подальших циклів обробки, підвищує пріоритет запасання та зберігання деревини та пиломатеріалів.

Постановка завдання. Метою цієї роботи є створення системи регулювання параметрів мікроклімату з урахуванням взаємовпливу параметрів та зовнішніх збурень на основі алгоритмів нечіткої логіки. Для цього пропонується виконати моделювання роботи такої системи і порівняти її з традиційною системою регулювання з використанням пропорційно-інтегрального (ПІ) регулятора. Результатом такого порівняння стане обґрунтування доцільності використання систем з нечіткою логікою для автоматизації регулювання параметрів мікроклімату в складських приміщеннях деревообробних підприємств з урахуванням їх багатосекційної структури та особливостей зберігання продукції.

Виклад основного матеріалу. Об'єкт управління являє собою багатосекційне складське приміщення. Для врахування впливу суміжних

приміщень будемо розглядати температуру повітря навколишнього середовища та температури суміжних приміщень або ж стінки заданого приміщення, як зовнішні збуренні. Зауважимо, що на відміну від впливу зовнішньої температури, існує можливість отримання функціональної залежності (математичної моделі у вигляді передавальної функції) для температура стінки. Також, варто відзначити наявний вплив вологості на температуру повітря і навпаки. Для систем регулювання параметрів мікроклімату варто розглядати саме відносну вологість – міру здатності повітря утримувати воду.

В ході дослідження літературних джерел [5] було знайдено підхід із апроксимацією моделі подібного об'єкта управління передавальною ланкою першого порядку з транспортним запізненням, формула (1):

$$\frac{Ke^{-\tau s}}{Ts + 1} \quad (1)$$

де

T – стала часу об'єкту;

τ – транспортна затримка;

K – коефіцієнт передачі об'єкта.

В ході дослідження системи було припущено, що умови навколишнього середовища є наступними:

- Надходження теплової енергії:
 $w = 1,248$ ккал/хв*°C
- Температура повітря, що надходить:
 $\theta_s = 10$ °C
- Абсолютна вологість повітря, що надходить:
 $x_s = 0,008$ кг/кг сухого повітря
- Температура зовнішнього повітря:
 $\theta_o = 32,5$ °C
- Абсолютна вологість зовнішнього повітря:
 $x_o = 0,0195$ кг/кг сухого повітря

Початкові умови взяті при $t = 0$ для $i = 1, 2, \dots, 5$:

- $\theta_i(0) = \theta_{wi}(0) = \theta_o$;
- $x_i(0) = x_o$

В результаті моделювання було отримано перехідні характеристики для температур повітря, стінки та відносної вологості для кожної з досліджуваних секцій приміщення, які наведено на рисунках 4, 5, 6.

З рисунку 4 можна побачити, що температури 1 та 2 швидко виходять на стаціонарне значення, проте для зон 3, 4 та 5 цей процес триває довше через більші теплові ємності та взаємодію з підлогою, стінами і системою охолодження. З рисунку 5 видно, що процеси є досить аперіодичними через високі теплові ємності. В свою чергу на рисунку 6 видно різке зростання вологості для зон 1 та 2,

що пов'язано зі швидким охолодженням припливного повітря. У цей же час вологість для зон 3, 4 та 5 швидко знижується через наявне теплове навантаження та повільно зростає після зниження температури стін.

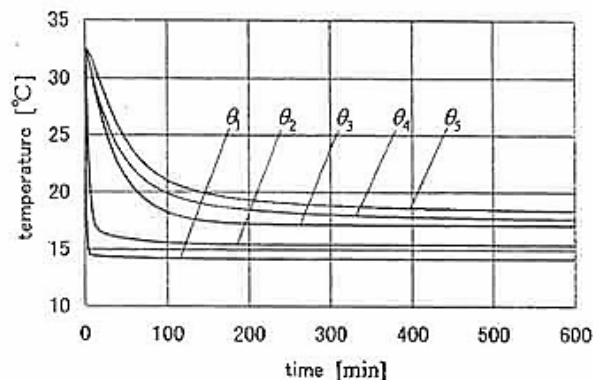


Рис. 4. Перехідні характеристики для температури повітря в приміщенні для кожної з досліджуваних секцій

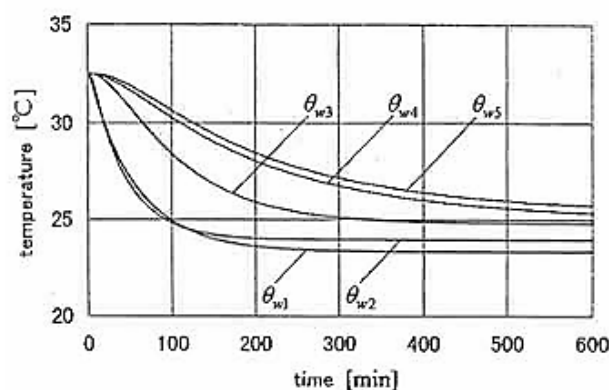


Рис. 5. Перехідні характеристики для температур стінки для кожної з досліджуваних секцій

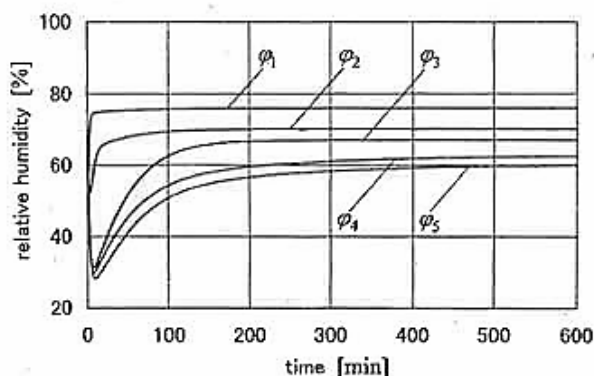


Рис. 6. Перехідні характеристики для відносної вологості для кожної з досліджуваних секцій

Передавальна функція по температурі повітря безпосередньо в приміщенні, описується формулою (2):

$$W(s)_{\text{буд.}} = \frac{2.5e^{-2.2s}}{1+37s} = \frac{2.5e^{-132s}}{1+2220s} \quad (2)$$

Передавальна функція по температурі поділяючої стінки між секціями приміщень описується формулою (3):

$$W(s)_{\text{ст.}} = \frac{1.544e^{-0.14s}}{1+2.5s} = \frac{1.544e^{-8.4s}}{1+150s} \quad (3)$$

Передавальна функція по відносній вологості в приміщенні описується формулою (4):

$$W(s)_{\text{вол.}} = \frac{0.66e^{-2.2s}}{1+2.9s} = \frac{0.66e^{-132s}}{1+174s} \quad (4)$$

У формулах (2,3,4) в першому випадку сталі часу та запізнення задані в хвилинах [6] і перераховані в секунди у другому випадку.

На рисунку 7 наведено схему автоматизації функціональну для припливно-витяжної вентиляційної установки. Розгляд її необхідний для розуміння всіх збурень та керуючих дій наявних в системі, для подальшого врахування при синтезі системи регулювання. Основними її компонентами є:

- Фільтруючі установки, що встановлені у припливному та витяжному каналах
- Два вентилятори - по одному на канал для управління якими використовуються частотні перетворювачі
- Секція нагріву повітря (водяний калорифер)
- Секція охолодження повітря (водяний охолоджувач)
- Секція зволоження повітря SKV з локальною автоматикою
- Вентиляційні заслінки
- Давачі температури з уніфікованим вихідним сигналом
- Давач вологості з діапазоном вимірювання 0-100%.
- Давач якості повітря для вимірювання концентрації різних шкідливих часток та газів, таких як вуглекислий газ, формальдегід, пил та інші.

Спочатку було синтезовано традиційну систему регулювання з ПІ-регулятором з врахуванням зовнішнього збурення у вигляді температури поділяючої стінки та взаємного впливу вологості повітря та температури. Така схема представлена на рис 8. Розрахунок налаштувань регулятора

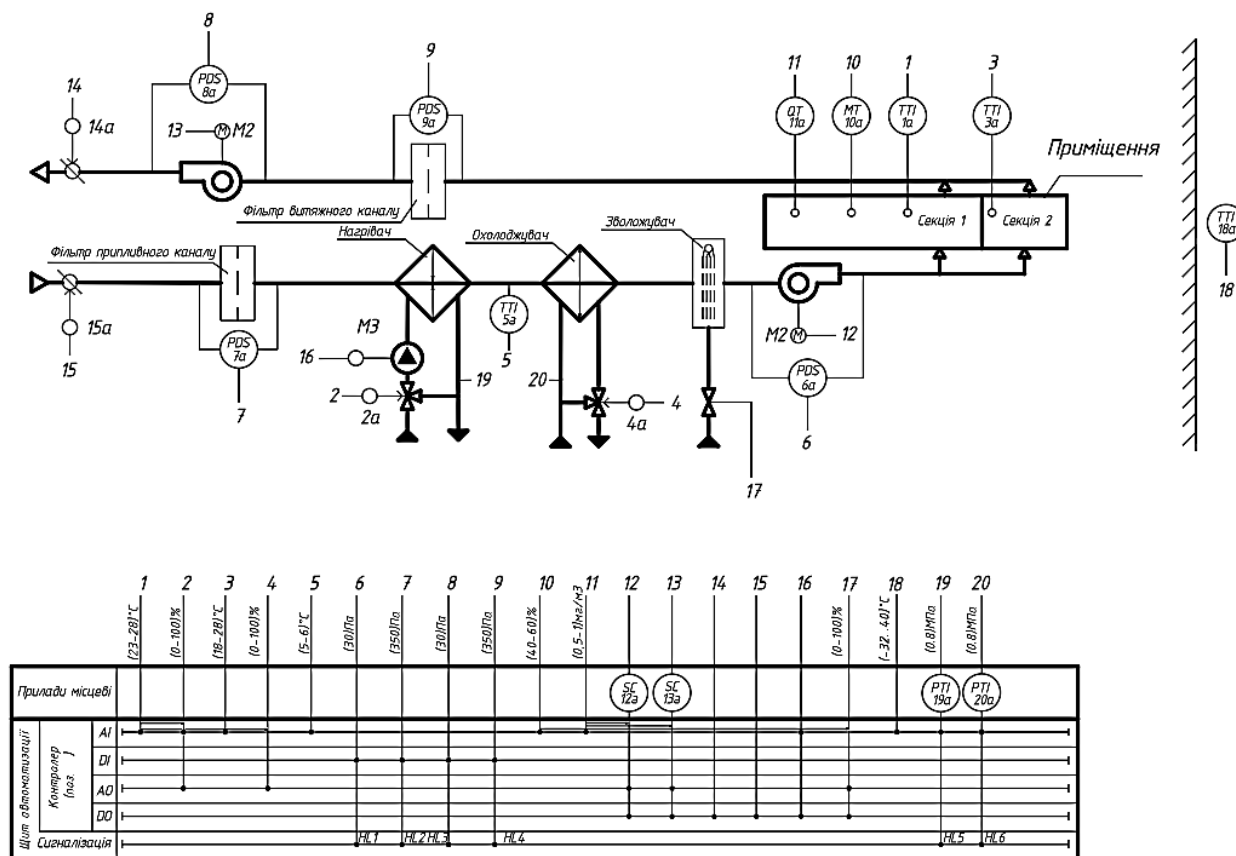


Рис. 7. Схема автоматизації функціональна

виконано методом розширених амплітудно-фазових характеристик (РАФХ) на степінь коливальної стійкості 0.3665 (відповідає коефіцієнту затування 0.9). Отримані в результаті моделювання перехідні процеси представлено на рисунку 9.

Була розглянута можливість застосування схеми з адаптуючим пристроєм на базі нечіткого регулятора [7]. Проте, це давало можливість врахувати лише зовнішні збурення по температурі, залишаючи поза увагою взаємовплив температури і вологості. Отже,

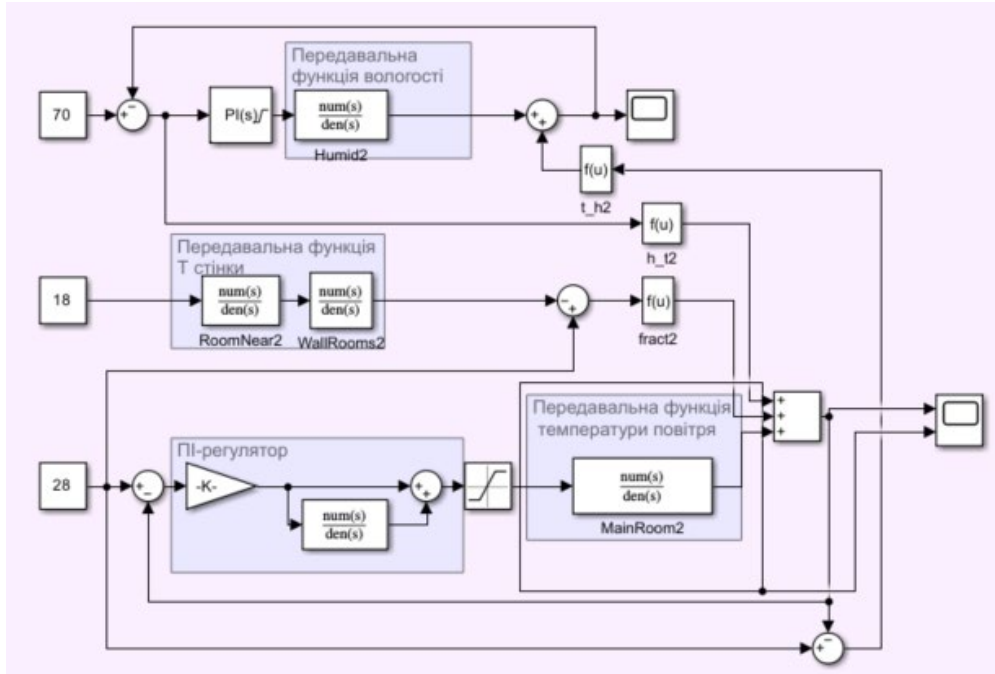


Рис. 8. Схема системи регулювання з ПІ- регулятором

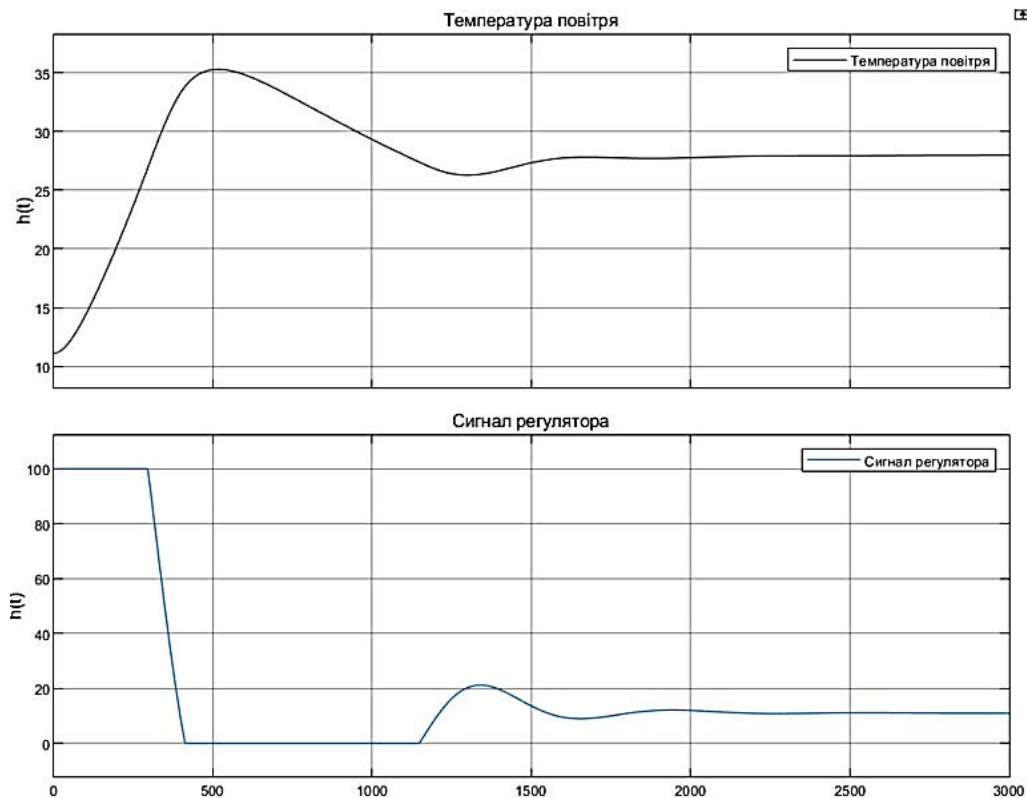


Рис. 9. Графіки перехідних процесів в системі з ПІ-регулятором

для застосування нечіткого регулятора було розроблена нова структура з трьома входами, кожен з яких має три функції приналежності, та одним виходом з чотирма функціями приналежності, показана на рисунку 10. Повна база правил містить 27 правил (максимальна можлива кількість для випадку 3 входів з 3 функціями приналежності кожний)

Схема системи регулювання з нечітким регулятором і врахуванням додаткових сигналів представлена на рисунку 11.

Отримані перехідні процеси для основного параметра – температури в приміщенні, температури стінки, відносної вологості та виходу регулятора, наведені на рисунку 12.

Слід зауважити, що для моделювання був обраний режим виходу на номінальне значення з нульових початкових умов. Такий спосіб було обрано для більшої наочності різниці в роботах зазначених систем.

Показники якості регулювання для обох систем зведено в таблицю 1. Таким чином, система

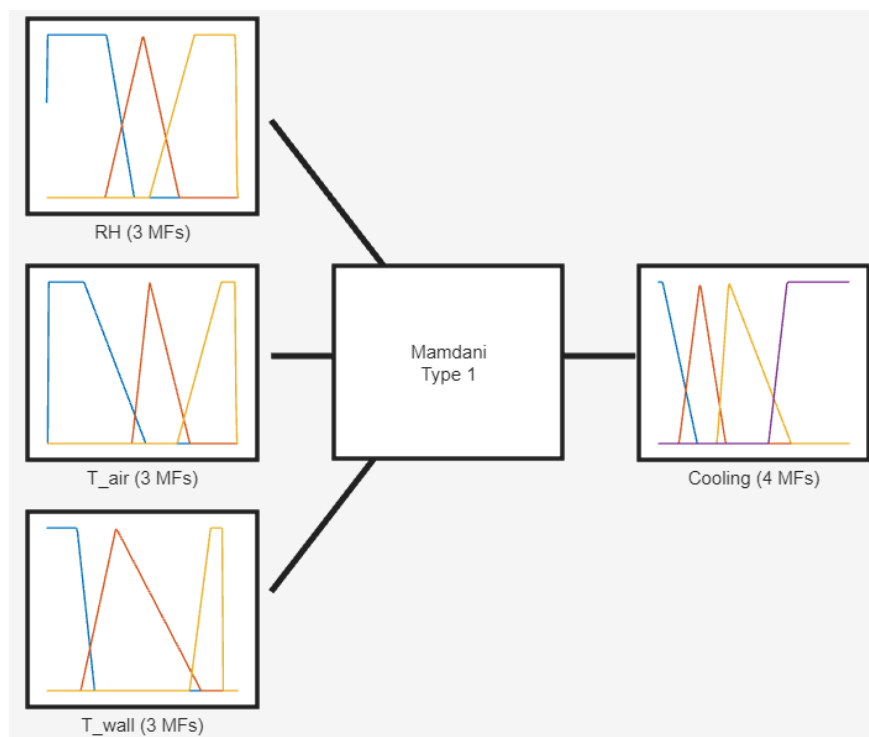


Рис. 10. Структурна схема нечіткого регулятора

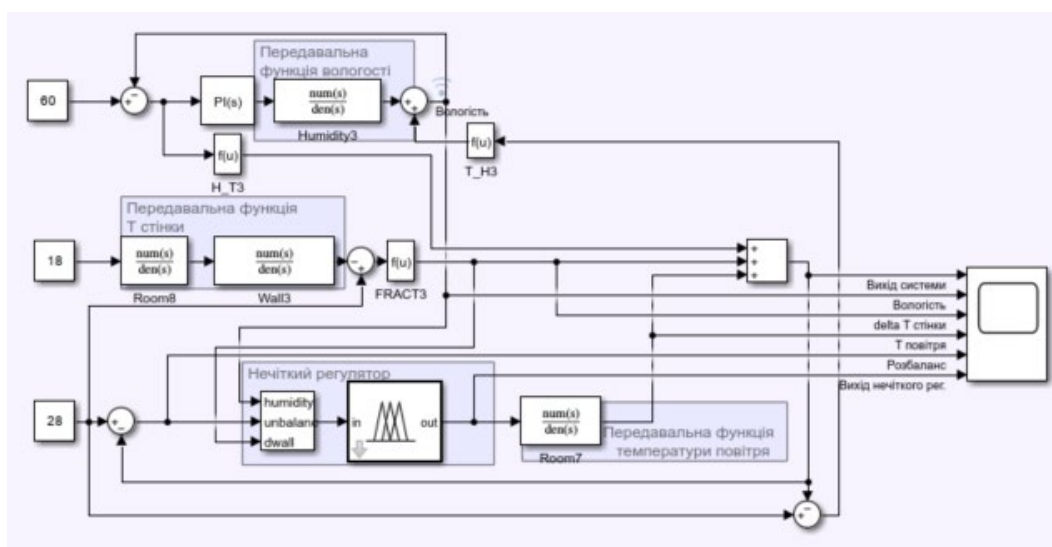


Рис. 11. Схема з нечітким регулятором з використанням додаткових параметрів

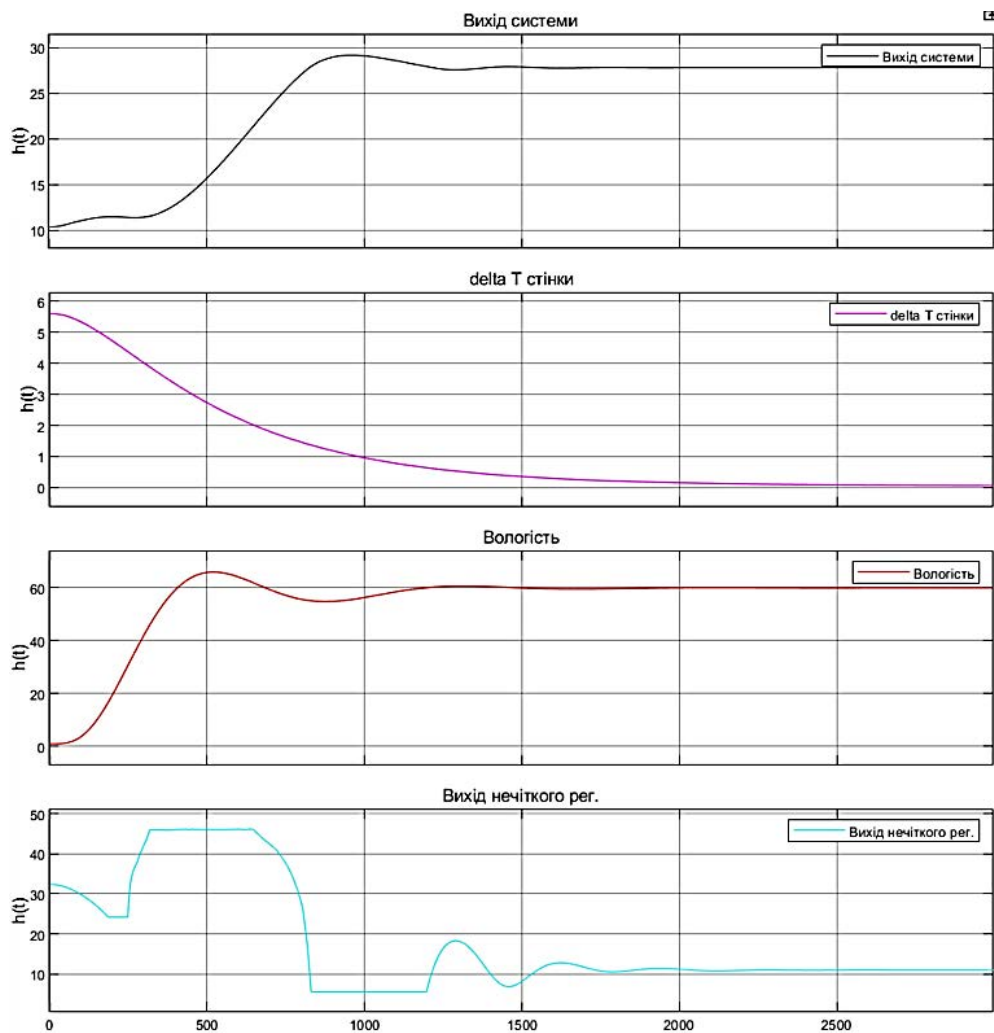


Рис. 12. Графіки зміни параметрів мікроклімату та вихідний сигнал нечіткого регулятора

з нечітким регулятором, практично за всіма показниками показала кращі результати, особливо за часом перехідного процесу та перерегулюванням. Тим не менш, слід визнати, що такі результати можливі лише за умови налаштування на певний робочий діапазон, на противагу універсальності роботи традиційної системи з ПІ-регулятором.

Таблиця 1
Порівняння прямих показників якості для нечіткого та ПІ-регулятора

Показник якості	ПІ	Нечіткий регулятор
Статична похибка $\Delta_{ст}$	0	0
Динамічна похибка $\Delta_{дин}$	7.82	1.35
Перерегулювання $\sigma, \%$	28	4.9
Коефіцієнт згасання ψ	1	0.93
Час перехідного процесу $t_{пер}, c$	1557.8	777.5

Висновки. В статті запропоновано рішення, що дозволяє врахувати зовнішні збурення та взаємозв'язок параметрів мікроклімату на основі алгоритмів нечіткої логіки. Проведено моделювання роботи системи з нечітким регулятором в умовах взаємовпливу параметрів мікроклімату та під впливом додаткових зовнішніх збурень та доведено її працездатність. Розраховано налаштування регулятора традиційної системи автоматичного регулювання з ПІ-регулятором методом розширених амплітудно-фазових характеристик. Порівняно роботу системи з нечітким регулятором з традиційною системою регулювання та показано переваги системи з нечітким регулятором над системою з ПІ – регулятором, як з точки зору якості регулювання, так і з точки зору гнучкості роботи.

Список літератури:

1. Штіфзон О. Й., Новіков П. В., Бунь В.П. Теорія автоматичного управління. [Електронний ресурс] : Навчальний посібник / НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Електронні текстові дані. Київ, 2020. 144 с. 1 файл: 2,2 Мбайт.
2. Cinar I., Ozkan I. A., Koklu M. Fuzzy Logic Based Controller Design for Control of Ventilation Systems. *Proceedings of the International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'18)* (26–28 October 2018, Konya, Turkey). Konya, 2018. P. 194–199.
3. Сахарнацька Л. І., Кочут Р. А. Особливості розвитку деревообробної промисловості в умовах воєнного стану. *Збалансоване природокористування*. 2023. № 3. С. 59–67. DOI: 10.33730/2310-4678.3.2023.287817.
4. Кизим М. О., Губарева І. О., Хаустова В. Є., Іванова О. Ю., Крячко Є. М., Колбасін Є. С., Харченко Р. В. Деревообробна промисловість України та країн світу: стан, проблеми і перспективи розвитку : кол. моногр. / за ред. М. О. Кизима, І. О. Губаревої. Харків : ФОП Лібуркіна Л. М., 2021. 272 с.
5. Kasahara M., Kuzuu Y., Matsuba T., Hashimoto Y., Kamimura K., Kurosu S. Physical Model of an Air-Conditioned Space for Control Analysis. *ASHRAE Transactions*. 2000. Vol. 106, Pt. 2. P. 4400–4414.
6. Popescu D. Specific problems on the operation of the automatic control system of temperature into an individual dwelling. *WSEAS Transactions on Systems*. 2014. Vol. 13. P. 482–491.
7. Shtifzon, O., Novikov, P. and Bahan T. Development of adaptive fuzzy-logic device for control under conditions of parametric non-stationarity. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 1, № 2 (91). P. 30–37. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.121749.

Shtifzon O.Y., Yudin O.S. MICROCLIMATE CONTROL SYSTEM USING FUZZY LOGIC FOR STORAGE FACILITIES AT A WOODWORKING ENTERPRISE

The article describes the system for regulating the microclimate parameters of a warehouse of a woodworking enterprise using fuzzy logic. The requirements for warehouse-type premises were determined based on the requirements for storing finished products. The control object was a supply and exhaust ventilation installation with a section for maintaining microclimate parameters (heating, cooling, humidification). The problems and requirements for regulating microclimate parameters, in particular temperature, under conditions of non-stationarity and in the presence of additional external disturbances are considered. The structures of automatic control systems that are traditionally used to solve such problems are analyzed. The practical impossibility of building a system taking into account all influencing factors within the traditional approach to designing such systems is shown. A proposed solution allows to take into account external disturbances together with relationship of microclimate parameters based on fuzzy logic algorithms. At the stage of synthesis of the fuzzy control system, the functional scheme of automation by the supply and exhaust ventilation system was fully examined. The operation of a system with a fuzzy controller under the simultaneous action of several external disturbances is simulated. The settings of the controller of a traditional automatic control system with a proportional-integral (PI) controller are calculated using the method of extended amplitude-phase characteristics. The operation of a system with a fuzzy controller is compared with a traditional control system based on a PI controller. Based on the simulation, the advantages of a system with a fuzzy controller over a system with a PI controller are shown, both in terms of control quality and in terms of flexibility of operation. The operability of a system with a fuzzy controller under the combined influence of external disturbances is proven. A simple and convenient way to configure a system with a fuzzy controller with a minimum set of rules is proposed.

Keywords: fuzzy logic, membership function, external disturbance, modeling, quality indicators.

Дата першого надходження статті до видання: 27.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Юрченко В.А.<https://orcid.org/0009-0001-2780-395X>

Харківський національний університет радіоелектроніки

Єрьоміна Н.С.<https://orcid.org/0000-0002-0463-2342>

Харківський національний університет радіоелектроніки

Близниченко О.М.<https://orcid.org/0009-0000-1654-1598>

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

АРХІТЕКТУРА БЛОКЧЕЙНУ ТА ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ У СУЧАСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

У статті розглянуто блокчейн-архітектури та консенсусні алгоритми, що лежать в основі сучасних децентралізованих інформаційних систем, а також особливості їх застосування у різних галузях діяльності. Основну увагу приділено класифікації блокчейн-систем за типами (публічні, приватні та консорціумні) та аналізу їх впливу на ефективність, безпеку й масштабованість систем. Досліджено принципи функціонування основних механізмів консенсусу, зокрема Proof of Work (PoW), Proof of Stake (PoS) та Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT), а також їх характеристики з точки зору швидкості обробки транзакцій, енергоефективності та стійкості до атак. Проведено порівняльний аналіз зазначених підходів, що дозволяє визначити їх доцільність використання залежно від вимог до системи. Розглянуто вплив вибору архітектури та консенсусного механізму на продуктивність інформаційних систем і здатність працювати в умовах високого навантаження. Окрему увагу приділено практичним аспектам застосування блокчейн-технологій у фінансових системах, системах управління даними та державних сервісах. У роботі використано методи порівняльного аналізу та моделювання для оцінки ефективності різних підходів. На основі отриманих результатів сформульовано рекомендації щодо вибору оптимальної архітектури та консенсусного алгоритму залежно від вимог до безпеки, швидкості обробки даних і рівня децентралізації. Отримані результати підтверджують, що раціональний вибір блокчейн-архітектури та механізму консенсусу дозволяє суттєво підвищити продуктивність систем при збереженні високого рівня захисту даних і адаптивності до різних умов застосування. Додатково підкреслюється, що комплексний підхід до аналізу архітектурних рішень і механізмів консенсусу сприяє більш обґрунтованому впровадженню блокчейн-технологій у практичних системах, враховуючи їхні функціональні та експлуатаційні особливості.

Ключові слова: блокчейн, архітектура, децентралізація, консенсусні алгоритми, Proof of Work, Proof of Stake, PBFT, масштабованість, продуктивність, цифрова економіка.

Постановка проблеми. Блокчейн-технології активно впроваджуються у різних галузях, зокрема у фінансових системах, електронній комерції, державному управлінні та Інтернеті речей. Водночас відсутність універсального підходу до вибору архітектури та механізму консенсусу ускладнює ефективне впровадження цих технологій. Різні типи блокчейн-архітектур і алгоритмів консенсусу мають суттєві відмінності за рівнем безпеки, продуктивності, енергоефективності та масштабованості, що створює проблему

вибору оптимального рішення для конкретних умов використання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні та практичні аспекти блокчейн-технологій досліджували Д. Яга та ін. [1], З. Ченг та ін. [2], а також Г.-Т. Нгуєн і К. Кім. [3]. У цих працях розглянуто архітектуру блокчейн-систем, структуру блоків і принципи організації розподілених реєстрів, а також основні консенсусні алгоритми, зокрема PoW, PoS і PBFT, та їх вплив на безпеку і продуктивність систем.

Питання практичного застосування блокчейн-технологій у бізнесі та системах Інтернету речей висвітлено в матеріалах IBM [4] і Deloitte [5], де показано потенціал підвищення прозорості та ефективності обробки даних. Перспективи розвитку блокчейну, зокрема інтеграцію зі штучним інтелектом і розширення сфер застосування, розглянуто в працях М. Сван [6], М. Кросбі та ін. [7], а також М. Ан та ін. [8].

Разом із тим, питання комплексного вибору оптимальної архітектури та консенсусного механізму з урахуванням вимог до продуктивності та безпеки залишаються недостатньо дослідженими.

Постановка завдання. Метою статті є підвищення ефективності та надійності інформаційних систем шляхом дослідження основних типів блокчейн-архітектур і консенсусних алгоритмів, а також розробка практичних рекомендацій щодо їх вибору залежно від вимог до масштабованості, безпеки та швидкості обробки даних.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: класифікувати блокчейн-архітектури за основними типами; проаналізувати принципи роботи ключових консенсусних алгоритмів; оцінити їх переваги та недоліки в різних умовах застосування; визначити вплив вибору архітектури та консенсусу на продуктивність систем; сформулювати рекомендації щодо оптимального використання блокчейн-технологій.

Виклад основного матеріалу. Для початку потрібно визначитися, що таке блокчейн, і для чого він потрібен. Блокчейни – це цифрові реєстри, захищені від підробки та взлому. Вони реалізовані в розподіленому форматі, тобто без центрального сховища або керівного органу, як-от банк, компанія чи уряд. Ці системи блокчейни дозволяють спільноті користувачів записувати транзакції в спільний реєстр, причому в нормальних умовах роботи блокчейн-мережі жодна транзакція не може бути змінена після публікації.

Основні ідеї, що лежать в основі блокчейн-технології, з'явилися наприкінці 1980-х і на початку 1990-х років. У 1989 році Леслі Лампорт розробив протокол Paxos і в 1990 році подав статтю "Парламент на неповний робочий день" до журналу ACM Transactions on Computer Systems. Ця стаття була опублікована в 1998 році. У праці Яга Д., Мелл П., Робі Н., Скарфон К. [1] описується модель консенсусу для досягнення згоди в мережі комп'ютерів, де самі комп'ютери або мережа можуть бути ненадійними. У 1991 році підписаний ланцюг інформації використовувався як електронний реєстр для цифрового підпису документів таким чином,

що можна було легко перевірити, чи жоден із підписаних документів не був змінений.

Блокчейн потрібен для забезпечення прозорого, безпечного та децентралізованого (де управління та прийняття рішень не зосереджені в одній організації, а рівномірно розподілені між учасниками мережі) способу зберігання та передачі даних. Основні його переваги:

- дані в блокчейні неможливо змінити без згоди учасників мережі, що захищає від підробок і зломів;

- усі учасники мають доступ до історії транзакцій, що підвищує довіру;

- відсутність центрального контролюючого органу;

- використання смарт-контрактів дозволяє автоматично виконувати угоди без посередників.

Блокчейн застосовується в фінансах, логістиці, охороні здоров'я, управлінні ланцюгами поставок, для цифрових валют (криптовалют) та у багатьох інших сферах.

Блокчейн-технології можна поділити на три основні типи: публічні, консорціумні та приватні. Кожен з них має свої особливості у контексті управління, безпеки, ефективності та рівня централізації. Публічні блокчейни, такі як Bitcoin чи Ethereum, доступні для будь-кого, тоді як консорціумні та приватні створені для використання певними організаціями або групами. У таблиці 1 порівнюються ключові властивості цих типів, щоб показати їхні переваги та обмеження.

Проаналізувавши таблицю Ченг З., Ксі С., Дай Х. -Н., Чен Х., Ванг Х. [2], можна зрозуміти, що різні типи блокчейнів задовольняють різні потреби користувачів і організацій. Публічні забезпечують високий рівень децентралізації та захисту від змін, проте страждають від низької ефективності. Консорціумні пропонують баланс між відкритістю та ефективністю, підходячи для співпраці між організаціями. Приватні мають найвищу ефективність, але менш децентралізовані та можуть бути змінені організацією, що ними керує. Вибір типу блокчейну залежить від конкретних вимог проекту, зокрема рівня безпеки, прозорості та швидкості операцій.

У сучасних блокчейн-технологіях використовуються різні типи консенсусних алгоритмів, які визначають, як мережа досягає згоди щодо правильності транзакцій. Основні типи цих алгоритмів – це алгоритми, що базуються на голосуванні, та доказові алгоритми. Алгоритм на основі голосування (наприклад, PBFT – Practical Byzantine Fault Tolerance) працюють на основі голосування між вузлами (нодами)

Порівняння типів блокчейну

Властивість	Публічний блокчейн	Консорціумний блокчейн	Приватний блокчейн
Визначення консенсусу	Усі майнери	Відібраний набір вузлів	Одна організація
Дозвіл на читання	Публічний	Може бути публічним або обмеженим	Може бути публічним або обмеженим
Незмінність	Майже неможливо змінити	Може бути змінено	Може бути змінено
Ефективність	Низька	Висока	Висока
Централізованість	Ні	Часткова	Так
Процес консенсусу	Без дозволу	З дозволом	З дозволом

мережі. Ноди – це окремі комп'ютери чи пристрої, які зберігають копію блокчейну та беруть участь у процесі підтвердження транзакцій. Кожен вузол в мережі має право голосу, і рішення ухвалюється більшістю. Такий підхід підходить для приватних або консорціумних, де кількість учасників обмежена, а ідентичність вузлів відома та управляється. Доказові алгоритми (як-от PoW – Proof of Work або PoS – Proof of Stake) працюють на основі доказу, який вузли мають надати, щоб підтвердити свою участь у процесі. Наприклад, в PoW, вузли повинні розв'язувати складні криптографічні задачі, щоб довести свої обчислювальні потужності. Це підходить для публічних блокчейнів, де будь-хто може приєднатися до мережі.

Алгоритм Proof of Work є одним із найстаріших і найбільш відомих методів досягнення консенсусу в блокчейнах, зокрема в таких системах, як Bitcoin. У PoW кожен вузол повинен розв'язати складну криптографічну задачу, яка потребує значних обчислювальних ресурсів. Ці задачі передбачають пошук значення, яке відповідає певним умовам хешування, що є енергозатратним і вимагає значної обчислювальної потужності. Як тільки вузол знаходить правильне рішення, воно транслюється до мережі, і решта вузлів можуть швидко перевірити його правильність. Після цього новий блок додається до ланцюжка, а вузол, який знайшов рішення, отримує нагороду у вигляді криптовалюти. Основні характеристики PoW:

- для вирішення завдань потрібна велика кількість електроенергії;
- чим більше обчислювальної потужності, тим важче здійснити атаку на мережу;
- вузли отримують винагороду за підтвердження транзакцій.

Алгоритм Proof of Stake є альтернативою PoW, яка націлена на зменшення енергоспоживання та підвищення ефективності. У PoS вузли (стейкери) підтверджують транзакції та створюють нові блоки на основі кількості криптовалюти, яку

вони "заставляють" у мережі. Чим більше монет вузол має у своєму розпорядженні, тим більша ймовірність того, що саме він зможе створити новий блок і отримати нагороду. Основні характеристики PoS:

- на відміну від PoW, тут не потрібно витратити багато електроенергії на обчислення;
- ймовірність створення блоку залежить від кількості монет, які вузол тримає на своєму рахунку;

– оскільки вузли вкладають свої кошти у мережу, вони мають економічну мотивацію підтримувати її безпеку та не вчиняти шахрайські дії.

PBFT (Practical Byzantine Fault Tolerance) є алгоритмом, який розроблено для забезпечення ефективної роботи розподілених систем у випадку наявності недобросовісних або несправних вузлів. Заснований на класичній проблемі візантійських генералів, що полягає в досягненні згоди між учасниками мережі навіть за умови, що деякі з них можуть діяти неправильно або зловмисно. Основні характеристики PBFT:

- кожен вузол у системі обмінюється повідомленнями з іншими вузлами для того, щоб узгодити загальний стан системи. Для досягнення консенсусу потрібно, щоб більшість (дві третини) вузлів погодилися на одне рішення, що робить систему стійкою до збоїв;

– PBFT ефективний для мереж із відносно невеликою кількістю учасників (десятки або сотні вузлів), тому що кожен вузол повинен спілкуватися з усіма іншими вузлами, що призводить до зростання кількості повідомлень у геометричній прогресії з ростом кількості учасників;

– у PBFT усі вузли ідентифікуються і мають відомих учасників, на відміну від PoW чи PoS, де вузли можуть бути анонімними, що дозволяє мережі точніше управляти процесом і виявляти зловмисні дії;

– оскільки PBFT вимагає голосування між обмеженою кількістю вузлів, він зазвичай засто-

совується в приватних або консорціумних блокчейнах, де контроль залишається в руках певної групи організацій;

– вузли в PBFT не отримують нагороди за участь у процесі консенсусу, оскільки це зазвичай реалізовано в приватних мережах, де учасники є довіреними сторонами.

Нижче наведена таблиця 2 з дослідження Нгуєн Г.-Т., Кім К. [3], яка порівнює голосувальні та доказові алгоритми за низкою критеріїв, що дозволяє краще зрозуміти їхні переваги та недоліки.

Наступним логічним кроком аналізу є практичне порівняння різних наборів алгоритмів та архітектур. Запуск реальних тестових блокчейн систем не є розумним рішенням, адже їхня перевірка, а також виділення ресурсів не є можливим в ході створення статті. Тому було вирішено симулювати роботу за допомогою алгоритмів на мові програмування Python. Було вирішено прослід-

кувати за TPS (кількість транзакцій за секунду) для різних консенсусних алгоритмів (PoW, PoS, PBFT). У блокчейні з алгоритмом консенсусу Proof of Work кількість транзакцій, які можна обробити за певний час, залежить від того, скільки часу потрібно для створення одного блоку. Алгоритм PoS також враховує час створення блоку, подібно до PoW, але в системах із PoS кількість вузлів зазвичай є меншою, і комунікація відбувається між довіреними вузлами. Розрахунок PBFT враховує додатковий час, необхідний для комунікації між вузлами. В PBFT кожен вузол повинен обмінюватися інформацією з іншими для досягнення консенсусу, що збільшує загальний час.

Отже, на виході маємо графік із результатами, що зображений на рисунку 1.

Можна побачити, що PoW та PoS мають схожі показники TPS, оскільки обидва алгоритми працюють на основі обробки транзакцій

Таблиця 2

Порівняння консенсусних алгоритмів

Критерій	Алгоритм на основі голосування	Доказовий алгоритм (PoW, PoS)
Основи прийняття рішень	Більшість рішень вузлів	Вузли, що виконали достатній доказ (PoW, PoS)
Вузли можуть приєднуватися вільно	Ні	Переважно так
Кількість вузлів, що виконують	Обмежена	Переважно необмежена
Децентралізація	Низька	Переважно висока
Довіра	Менш надійна	Більш надійна
Ідентичність вузлів управляється	Так	Ні
Загроза безпеці	Менш серйозна	Більш серйозна
Нагорода	Переважно немає	Є

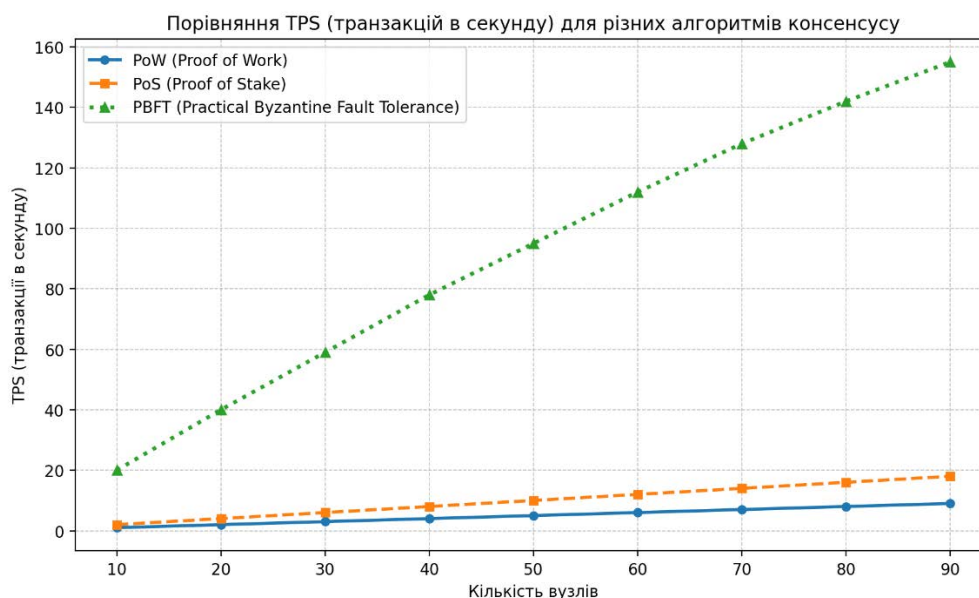


Рис. 1. Результати симуляції роботи PoW, PoS, PBFT

через визначений механізм консенсусу, який має схожу структуру. У PoW вузли виконують обчислювальні задачі для підтвердження транзакцій, а в PoS – вузли, що володіють певною кількістю монет, беруть участь у підтвердженні транзакцій. Обидва ці механізми потребують певного часу для обробки транзакцій, і їх ефективність залежить від кількості вузлів та необхідного часу для формування блоку. Тому показники TPS у цих алгоритмах зазвичай мають схожий рівень, а PBFT – значно вищі. Також, видно, що чим більше вузлів, тим вищі показники TPS. Водночас, алгоритм PBFT демонструє значно вищі показники TPS (на 700-1500% вище за PoS/PoW залежно від кількості вузлів) завдяки оптимізації процесу обробки транзакцій, що підтверджує його ефективність для приватних корпоративних мереж. PBFT працює в більш контрольованому середовищі з обмеженою кількістю вузлів, що дозволяє йому значно швидше досягати консенсусу між вузлами, не потребуючи складних обчислень (як у PoW) чи великих фінансових вкладень (як у PoS). Час, витрачений на комунікацію між вузлами, є основним фактором, який може знизити загальну ефективність.

Тепер, проаналізувавши та порівнявши всі архітектури та алгоритми, можна розібрати приклади їх використання у різних сферах. У 2024 році найголовнішою сферою використання блокчейну залишається криптовалюта, зокрема Bitcoin, Ethereum та інші цифрові валюти. Завдяки своїй дистрибутивній природі, блокчейн дозволяє створювати безпечні, прозорі та анонімні системи для фінансових операцій, що робить їх популярними серед користувачів по всьому світу. Криптовалюти на основі блокчейну дозволяють здійснювати миттєві транзакції без посередників, що знижує витрати і спрощує фінансові операції.

Окрім фінансових операцій, блокчейн також знаходить застосування в інших сферах. Наприклад, IBM займається трьома проектами - IBM Sterling Transparent Supply, IBM Food Trust, Hyperledger Fabric Support Edition. IBM Sterling Transparent Supply забезпечує повну відстежуваність товарів у ланцюгах поставок, використовуючи блокчейн для забезпечення прозорості та мінімізації шахрайства. IBM Food Trust зосереджений на підвищенні безпеки та прозорості в ланцюгах постачання продуктів харчування, дозволяючи відстежувати походження продукції та гарантувати її якість. IBM [4] пропонує підтримку для створення корпоративних блокчейн-мереж з модулярною архітектурою, що дозволяє

бізнесам налаштовувати консенсусні механізми та рівні доступу до даних, забезпечуючи високу конфіденційність і гнучкість у використанні технології блокчейн для різних галузей.

До того ж, можна додати проєкт Deloitte [5], що використовує передові технології для підтримки інноваційних рішень у сфері водоочистки (wastewater treatment). У поєднанні з блокчейн-технологією LinuxONE дозволяє створити ефективні та безпечні архітектури для обробки, зберігання та обміну даними, що виникають в процесах очищення стічних вод.

Щодо фінансів, використовуючи блокчейн, можна створювати кредитні договори без участі традиційних банків. Користувачі можуть позичати або отримувати кредити на основі смарт-контрактів, де умови виконуються автоматично при досягненні зазначених параметрів (наприклад, надана застава або досягнутий ліміт). Це дозволяє значно знизити витрати на обробку транзакцій і скоротити час на перевірку кредитоспроможності. До того ж, Блокчейн дозволяє створювати біржі, де користувачі можуть обмінювати валюту або активи без участі центральної організації. Наприклад, Сван М. [6] описує, що Uniswap та інші DEX-платформи використовують смарт-контракти для автоматичного виконання угод без необхідності довіряти брокерам або іншим посередникам. Це забезпечує більшу прозорість і контроль за транзакціями з боку користувачів.

Повертаючись до прикладів не пов'язаних з фінансами, можна згадати про відслідковування продуктів харчування. Завдяки блокчейну кожен етап постачання продуктів, від виробника до споживача, може бути записаний в незмінний реєстр. Кожен учасник ланцюга (виробник, постачальник, дистриб'ютор, роздрібний продавець) додає дані про товар у блокчейн. Це забезпечує максимальну прозорість і дозволяє відслідковувати будь-які зміни в ланцюгу постачання. Як зазначають у своїй праці Кросбі М., Паттанаяк П., Верма С., Калянараман В. [7], можна точно дізнатися, де знаходиться товар, коли він був виготовлений і коли доставлений, а також перевірити, чи дотримувалися умови зберігання та транспортування. Прозорість і боротьба з підробками: для харчових продуктів або ліків, це особливо важливо, оскільки можна гарантувати, що продукти не були підроблені на будь-якому етапі їх виробництва або доставки. Блокчейн дає змогу споживачам, урядам та контрольним органам перевіряти автентичність продуктів, що запобігає шахрайству і покращує безпеку товарів.

До того ж, слід згадати і ШІ, який почав неймовірно стрімко розвиватися з 2022 року. Використання поєднаних технологій штучного інтелекту та блокчейну, за даними Ан М. та ін. [8], знаходиться на початковому етапі досліджень, однак, враховуючи застосування методів підкріплювального навчання для оптимізації роботи блокчейну, можна очікувати, що ШІ зможе сприяти розвитку цієї технології. Смарт-контракти, з точки зору правових аспектів блокчейну, є не лише “розумними контрактами”, оскільки їхня суть полягає в досягненні угоди через транзакцію. Технології ШІ можуть допомогти створювати інтелектуальні прогностичні механізми, що робить ці контракти більш ефективними та адаптованими до різних умов.

Надалі, є сенс навести можливі приклади та описати можливі архітектури блокчейну.

Земельний кадастр та аграрний сектор:

– Сфера: Реєстрація та торгівля земельними ділянками.

– Консенсус: Proof of Stake,

– Архітектура: Використання публічного блокчейну для реєстрації прав власності на землю та торгівлі земельними ділянками. Поєднання PoS для швидкого і надійного підтвердження операцій із землею та традиційної бази даних для зберігання державних реєстрів.

– Приклад застосування: Український Державний земельний кадастр може використовувати PoS для реєстрації прав власності на землю, щоб фіксувати зміни власників у блокчейні. Це забезпечить швидкий доступ до інформації про земельні угіддя та дозволить уникнути маніпуляцій.

– Перевага: Низькі енергетичні витрати на підтримку мережі та висока безпека завдяки блокчейну.

Вибірчі системи (E-voting):

– Сфера: Електронні вибори, голосування.

– Консенсус: PoW для децентралізованих виборчих платформ, PoS для управління голосами.

– Архітектура: Використання PoW для фіксації кожного голосу в публічному блокчейні, що гарантує незмінність голосів. PoS може використовуватися для перевірки та підрахунку голосів у децентралізованій системі.

– Приклад застосування: застосування PoS для електронного голосування на державних виборах, де кожен голос буде підтверджуватися через блокчейн для забезпечення його незмінності.

– Перевага: Гарантована прозорість процесу голосування та неможливість фальсифікації результатів.

"Дія" – Електронне урядування:

– Сфера: Електронні вибори, голосування.

– Консенсус: PBFT приватний блокчейн з обмеженим доступом і стійкістю до зловмисних вузлів.

– Архітектура: Гібридна, з розподіленим приватним блокчейном для державних транзакцій і централізованою базою даних для масивів персональних даних громадян.

– Приклад застосування: Видання електронного документа (права на автомобіль), транзакція підтверджується через блокчейн, зберігається у базі даних "Дія".

– Перевага: Забезпечення незмінності даних, Прозорість і аудит, Безпека, Інтероперабельність.

Також, блокчейн можна інтегрувати у ProzoTo (система публічних закупівель), реєстр нерухомості, енергетичні платформи (Green Energy та децентралізована енергетика), логістика та відстеження вантажів (Tracking & Shipping), мікрофінансування (P2P-платформи кредитування), використовуючи різні архітектури та алгоритми.

Висновки. У процесі аналізу блокчейн-технологій було розглянуто основні принципи їх функціонування, різноманітні типи алгоритмів консенсусу, а також їх вплив на ефективність та безпеку децентралізованих систем. Дослідження показало, що технологія блокчейн не лише змінила підходи до управління цифровими валютами, а й стала основою для розвитку різноманітних інновацій у багатьох галузях, таких як фінанси, логістика, охорона здоров'я та управління ланцюгами постачання.

Основними результатами дослідження є:

– визначено, що алгоритми Proof of Work (PoW) та Proof of Stake (PoS) мають схожі показники TPS, але значно відрізняються за рівнем децентралізації та ефективності. Водночас, алгоритм PBFT демонструє значно вищі показники TPS завдяки оптимізації процесу обробки транзакцій;

– розглянуто приклади використання блокчейну в різних сферах (криптовалюти, управління ланцюгами постачання, IoT) підтверджують його потенціал як інструменту для підвищення прозорості, безпеки та ефективності. Зокрема, використання блокчейн-технології в управлінні ланцюгами постачання та відслідковуванні продуктів харчування дозволяє значно знизити ризик підробок і покращити управлінські процеси;

– оцінка різних підходів до забезпечення консенсусу та безпеки в блокчейн-системах дозволяє сформулювати рекомендації для вибору оптимального алгоритму в залежності від специфіки використання. Також введено нові ідеї щодо розвитку блокчейн-рішень в контексті масштабованості та інтеграції з іншими технологіями, такими як Інтернет речей (IoT).

Отже, результатами цього дослідження є не лише теоретичні висновки, а й практичні рекомендації, які можуть бути використані для впровадження блокчейн-технологій у різних галузях.

Список літератури:

1. Yaga D., Mell P., Roby N., Scarfone K. Blockchain Technology Overview. *National Institute of Standards and Technology*, 2018. 68 p. DOI: <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8202> (дата звернення: 18.10.2024).
2. Zheng Z., Xie S., Dai H.-N., Chen X., Wang H. An Overview of Blockchain Technology: Architecture, Consensus, and Future Trends. 2017 IEEE International Congress on Big Data (BigData Congress). IEEE, 2017. P. 557–564. DOI: <https://doi.org/10.1109/BigDataCongress.2017.85> (дата звернення: 18.10.2024).
3. Nguyen G.-T., Kim K. A Survey about Consensus Algorithms Used in Blockchain. *Journal of Information Processing Systems*, 2018. Vol. 14, no. 1. P. 101–128. DOI: <https://doi.org/10.3745/JIPS.01.0024> (дата звернення: 19.10.2024).
4. IBM Blockchain – Enterprise Blockchain Solutions & Services. IBM. URL: <https://www.ibm.com/blockchain> (дата звернення: 20.10.2024).
5. Deloitte. Blockchain and the IoT. Deloitte Insights, 2020. 18 p.
6. Swan M. Blockchain: Blueprint for a New Economy. O'Reilly Media, 2018. 149 p.
7. Crosby M., Pattanayak P., Verma S., Kalyanaraman V. Blockchain Technology: Beyond Bitcoin. *Applied Innovation Review*, 2016. No. 2. P. 71.
8. An M. та ін. Blockchain Technology Research and Application: A Literature Review and Future Trends. *Journal of Data Science and Intelligent Systems*, 2023. P. 1–12.

Yurchenko V.A., Yeromina N.S., Blyznychenko O.M. BLOCKCHAIN ARCHITECTURE AND ITS APPLICATION IN MODERN INFORMATION SYSTEMS

The article examines blockchain architectures and consensus algorithms that form the basis of modern decentralized information systems, as well as the features of their application in various fields. Particular attention is paid to the classification of blockchain systems by type (public, private, and consortium) and to the analysis of their impact on system efficiency, security, and scalability. The principles of operation of the main consensus mechanisms are studied, including Proof of Work (PoW), Proof of Stake (PoS), and Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT), along with their characteristics in terms of transaction processing speed, energy efficiency, and resistance to attacks. A comparative analysis of these approaches is conducted, which makes it possible to determine their suitability depending on system requirements. The influence of architectural choices and consensus mechanisms on the performance of information systems and their ability to operate under high load conditions is considered. Special attention is given to practical aspects of blockchain technology implementation in financial systems, data management systems, and government services. The study employs comparative analysis and modeling methods to evaluate the effectiveness of different approaches. Based on the obtained results, recommendations are formulated for selecting the optimal architecture and consensus algorithm depending on security requirements, data processing speed, and the level of decentralization. The results confirm that a rational choice of blockchain architecture and consensus mechanism significantly improves system performance while maintaining a high level of data security and adaptability to various application conditions. Additionally, it is emphasized that a comprehensive approach to the analysis of architectural solutions and consensus mechanisms contributes to a more justified implementation of blockchain technologies in practical systems, taking into account their functional and operational characteristics.

Keywords: blockchain, architecture, decentralization, consensus algorithms, Proof of Work, Proof of Stake, PBFT, scalability, performance, digital economy.

Дата першого надходження статті до видання: 23.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Якименко М.С.

<https://orcid.org/0000-0003-3290-6088>

Центральноукраїнський національний технічний університет

Босько В.В.

<https://orcid.org/0000-0002-4933-9676>

Центральноукраїнський національний технічний університет

Бокій А.Р.

<https://orcid.org/0009-0006-1426-261X>

Центральноукраїнський національний технічний університет

Лисенко І.А.

<https://orcid.org/0000-0003-4394-4960>

Центральноукраїнський національний технічний університет

Мелешко Є.В.

<https://orcid.org/0000-0001-8791-0063>

Центральноукраїнський національний технічний університет

МЕТОДИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ В MESH-МЕРЕЖАХ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

У статті досліджено сучасні методи енергоефективної маршрутизації в Mesh-мережах Інтернету речей, що функціонують в умовах обмежених енергетичних ресурсів вузлів, динамічної топології та зростаючих вимог до якості передачі даних. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення тривалості функціонування IoT-мереж, зниження енергоспоживання вузлів і забезпечення стабільності передачі інформації в розподілених середовищах.

Метою статті є систематизація існуючих підходів до енергоефективної маршрутизації в Mesh-мережах Інтернету речей, аналіз їх переваг і обмежень, а також визначення перспективних напрямів розвитку в даній області. У роботі виконано класифікацію методів маршрутизації за принципами організації та критеріями оптимізації, зокрема виділено кластеризаційні, ієрархічні (RPL-орієнтовані), балансувальні, QoS-орієнтовані, інтелектуальні та протокольно-орієнтовані підходи.

Проведений аналіз показав, що кластеризаційні методи забезпечують зниження енергоспоживання за рахунок агрегування даних, однак є чутливими до вибору вузлів-координаторів. Протоколи на основі RPL відзначаються стандартизованістю та широким застосуванням, проте не завжди ефективно використовують можливості Mesh-архітектури. Балансувальні методи дозволяють підвищити тривалість функціонування мережі шляхом рівномірного розподілу навантаження, але можуть збільшувати затримку передачі. Інтелектуальні підходи, засновані на алгоритмах машинного навчання та swarm intelligence, демонструють високий рівень адаптивності, проте обмежені складністю реалізації на ресурсно обмежених пристроях.

У результаті дослідження встановлено, що енергоефективна маршрутизація в IoT Mesh-мережах потребує комплексного врахування енергетичних, топологічних та трафікових характеристик мережі. Визначено, що перспективним напрямом є розроблення адаптивних багатокритеріальних методів маршрутизації, здатних забезпечити баланс між енергоефективністю, надійністю та обчислювальними витратами.

Ключові слова: Інтернет речей, Mesh-мережі, комп'ютерні мережі, бездротові сенсорні мережі, маршрутизація, енергоефективність, кластеризація, балансування навантаження, адаптивні алгоритми, QoS.

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток технологій Інтернету речей (IoT) призводить до значного збільшення кількості підключених пристроїв, що функціонують у складі розподілених бездротових мереж. Одним із перспективних підходів до організації таких мереж є використання Mesh-архітектури, яка забезпечує підвищену надійність, масштабованість та здатність до самовідновлення за рахунок багатошляхової передачі даних.

Разом із тим, вузли IoT-мереж, як правило, характеризуються обмеженими енергетичними ресурсами, обчислювальною потужністю та пропускною здатністю каналів зв'язку. У таких умовах традиційні алгоритми маршрутизації, орієнтовані переважно на мінімізацію затримок або довжини маршруту, не забезпечують ефективного використання енергоресурсів мережі, що призводить до передчасного виходу з ладу окремих вузлів та зниження загальної функціональної стійкості системи.

Особливої актуальності набуває задача побудови енергоефективних методів маршрутизації в Mesh-мережах Інтернету речей, які враховують не лише топологічні характеристики мережі, але й енергетичний стан вузлів, інтенсивність трафіку та динаміку змін мережевого середовища. Існуючі підходи до вирішення цієї задачі часто є або надто спрощеними, або потребують значних обчислювальних ресурсів, що обмежує їх застосування в реальних IoT-системах.

Таким чином, виникає необхідність дослідження та вдосконалення методів і моделей енергоефективної маршрутизації в Mesh-мережах Інтернету речей, які забезпечують збалансоване використання ресурсів вузлів, підвищують тривалість функціонування мережі та зберігають прийнятний рівень якості обслуговування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних роботах підкреслюється, що традиційні алгоритми маршрутизації не враховують специфіку IoT-середовища, зокрема обмеженість ресурсів, динамічність топології та необхідність масштабованості [1, 2]. Значна частина досліджень присвячена вдосконаленню класичних протоколів маршрутизації для бездротових сенсорних мереж, які стали основою IoT [3, 8].

Зокрема, кластерні протоколи типу LEACH забезпечують зменшення енергоспоживання за рахунок агрегування даних і розподілу ролей між вузлами [3]. Подальший розвиток отримали протоколи на основі стандарту RPL, які використовують деревоподібну структуру маршрутизації

та дозволяють враховувати різні метрики, включаючи енергоспоживання, затримку та надійність передачі [4, 9].

Останні дослідження демонструють перехід до адаптивних методів маршрутизації, зокрема із застосуванням машинного навчання, еволюційних алгоритмів та swarm intelligence [5, 10, 11]. Такі підходи дозволяють динамічно змінювати маршрути залежно від стану мережі та залишкової енергії вузлів [12].

Окремий напрям пов'язаний із застосуванням Mesh-архітектури, яка забезпечує багатошляхову передачу даних і підвищену відмовостійкість мережі [6, 13]. У сучасних дослідженнях аналізуються також стандарти Zigbee, Thread та інші технології, орієнтовані на побудову IoT Mesh-мереж [7, 14].

Важливим аспектом є балансування навантаження між вузлами мережі, оскільки використання одних маршрутів призводить до нерівномірного виснаження енергоресурсів [8, 15]. У зв'язку з цим розробляються методи, що враховують залишкову енергію вузлів і стан каналів зв'язку [16, 17].

Також у сучасних роботах досліджуються питання безпеки та надійності маршрутизації в IoT Mesh-мережах, включаючи виявлення атак, забезпечення довіри та захист передачі даних [18, 19].

Незважаючи на значну кількість досліджень, універсального підходу до енергоефективної маршрутизації в IoT Mesh-мережах наразі не існує [1, 5, 20].

Мета роботи. Метою статті є дослідження та систематизація існуючих методів енергоефективної маршрутизації в Mesh-мережах Інтернету речей, аналіз їх ефективності з урахуванням обмежених енергетичних ресурсів вузлів, динаміки топології мережі та вимог до якості обслуговування, а також визначення переваг і обмежень цих методів.

Виклад основного матеріалу. Як показав аналіз публікацій, енергоефективна маршрутизація в Mesh-мережах Інтернету речей розвивається переважно у межах кількох основних підходів: кластеризаційних, ієрархічних, географічних, багатокритеріальних, інтелектуальних та балансувальних методів [1, 5, 8]. Їх спільною метою є зниження енергоспоживання вузлів, продовження часу функціонування мережі та збереження прийнятної якості передачі даних.

Одним із найвідоміших підходів є кластеризаційна маршрутизація, представлена протоколом LEACH та його модифікаціями [3]. У таких

методах вузли мережі об'єднуються у кластери, а окремі з них виконують роль голів кластерів, агрегуючи дані та передаючи їх далі. Перевагою цього підходу є зменшення кількості прямих передач і, відповідно, зниження енергоспоживання. Водночас ефективність LEACH значною мірою залежить від правильного вибору голів кластерів, а при нерівномірному розподілі навантаження окремі вузли можуть швидко виснажувати свій енергетичний ресурс [3, 8, 12].

Інший поширений напрям становлять протоколи на основі RPL, які широко застосовуються в IoT-мережах із малопотужними й ненадійними каналами зв'язку [4, 9]. Їх перевагою є підтримка стандартизованої маршрутизації в мережах IPv6 та можливість використання різних цільових функцій для врахування енергії, затримки, якості каналу та інших параметрів. Разом із тим RPL зазвичай орієнтований на деревоподібну структуру маршрутів, що не завжди повною мірою реалізує потенціал Mesh-мережі з її багатошляховістю та самовідновленням [4, 9].

В окрему групу доцільно виділити методи балансування навантаження, у яких вибір маршруту виконується з урахуванням залишкової енергії вузлів і рівномірного розподілу трафіку [8, 15, 16]. Такі підходи зменшують ймовірність передчасного виходу з ладу найбільш навантажених вузлів і сприяють підвищенню загальної тривалості життя мережі. Однак вони можуть супроводжуватися зростанням затримки передачі, оскільки енергооптимальний маршрут не завжди є найкоротшим [16, 17].

Значний інтерес у сучасних дослідженнях викликають інтелектуальні методи маршрутизації, засновані на swarm intelligence, генетичних алгоритмах, нечіткій логіці та машинному навчанні [5, 10, 11]. Їх перевага полягає в адаптивності до змін топології мережі, навантаження та енергетичного стану вузлів. Такі методи дозволяють розглядати маршрутизацію як задачу багатокритеріальної оптимізації, де одночасно враховуються енергоспоживання, затримка, надійність і пропускна здатність. Водночас реалізація подібних алгоритмів у реальних IoT-пристроях обмежується їх обчислювальною складністю та вимогами до пам'яті [5, 10].

Окремий практичний напрям пов'язаний із застосуванням Mesh-архітектури в стандартах Zigbee, 6LoWPAN і Thread [7, 14]. У цих технологіях енергоефективність досягається не лише на рівні алгоритмів маршрутизації, а й за рахунок оптимізації протоколів доступу до середовища, коротких пакетів, сплячих режимів і локальної ретрансляції даних. Проте в таких системах методи маршрутизації зазвичай тісно прив'язані до конкретного протоколу, що обмежує їх універсальність [7, 14].

Таким чином, аналіз існуючих методів показує, що кожен із підходів має свої переваги та обмеження. Кластеризаційні методи забезпечують простоту та зменшення енергоспоживання, але чутливі до вибору вузлів-агрегаторів; RPL-підходи добре інтегруються з IoT-інфраструктурою, але тяжіють до ієрархічної організації; балансувальні методи покращують розподіл ресурсу вузлів, проте можуть збільшувати довжину маршрутів; інтелектуальні алгоритми є найбільш адаптивними, але вимагають більших обчислювальних ресурсів [3–5, 8–11, 15, 16]. Отже, вибір методу енергоефективної маршрутизації в Mesh-мережах Інтернету речей повинен визначатися не лише рівнем енергозбереження, а й вимогами до масштабованості, затримки, складності реалізації та особливостей конкретного середовища застосування.

Наведене порівняльне дослідження показує, що найбільш простими для реалізації є кластерні та стандарто-орієнтовані методи, однак вони не завжди забезпечують достатню адаптивність у динамічних Mesh-мережах. Найбільш перспективними з погляду якості прийняття рішень є багатокритеріальні, swarm- та AI-орієнтовані підходи, оскільки вони дозволяють одночасно враховувати енергетичний стан вузлів, якість каналів і параметри трафіку [5, 10, 11]. Разом із тим для реальних IoT-систем критичним залишається компроміс між ефективністю маршрутизації та складністю її реалізації на обмежених за ресурсами пристроях [1, 2, 8]. Тому в практичних сценаріях доцільним є поєднання простих енергоорієнтованих механізмів із адаптивними критеріями вибору маршруту, що дозволяє досягти прийняттого балансу між енергоефективністю, надійністю та обчислювальними витратами.

Висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено, що енергоефективна маршрутизація є одним із ключових факторів забезпечення ефективного функціонування Mesh-мереж Інтернету речей, оскільки більшість вузлів таких мереж характеризується обмеженими енергетичними ресурсами та працює в умовах динамічної топології.

Показано, що існуючі методи енергоефективної маршрутизації можуть бути умовно поділені на кілька основних груп: кластеризаційні, ієрархічні (зокрема RPL), балансувальні, QoS-орієнтовані, інтелектуальні (на основі swarm intelligence та машинного навчання), а також протокольно-орієнтовані рішення, реалізовані в сучасних IoT-стандартах. Визначено, що кожен із підходів має власні переваги та обмеження, пов'язані з рівнем енергоефективності, складністю реалізації, адаптивністю та здатністю працювати в умовах динамічної мережі.

Встановлено, що кластерні та RPL-подібні методи є найбільш поширеними завдяки віднос-

**Порівняльна характеристика методів
енергоефективної маршрутизації в IoT Mesh-мережах**

№	Метод / підхід	Принцип роботи	Основні переваги	Основні недоліки
1	LEACH та LEACH-подібні кластерні методи [3, 8, 12]	Об'єднання вузлів у кластери, передача даних через голови кластерів	Зменшення кількості передач, агрегування даних, зниження енергоспоживання	Нерівномірне навантаження на голови кластерів, залежність від механізму їх вибору
2	RPL-підходи [4, 9]	Побудова ієрархічного маршрутизуючого графа для малопотужних мереж	Стандартизованість, підтримка IPv6, можливість використання різних метрик	Обмежена гнучкість у чисто mesh-сценаріях, залежність від цільових функцій
3	Балансувальні енергоорієнтовані методи [8, 15, 16]	Вибір маршруту з урахуванням залишкової енергії вузлів	Подовження часу життя мережі, запобігання перевантаженню окремих вузлів	Можливе збільшення затримки та довжини маршруту
4	QoS-орієнтовані методи [17]	Урахування енергії, затримки, надійності та пропускну здатності	Компроміс між якістю обслуговування та енергоефективністю	Більша складність вибору маршруту
5	Swarm intelligence / еволюційні методи [5, 11]	Оптимізація маршрутів на основі колективної поведінки або еволюційного пошуку	Адаптивність, багатокритеріальна оптимізація, гнучкість	Значні обчислювальні витрати
6	AI / ML-орієнтовані методи [10]	Побудова маршрутів на основі прогнозування стану мережі та навчання	Висока адаптивність, можливість врахування багатьох параметрів	Складність реалізації на малопотужних вузлах, потреба в даних для навчання
7	Протокольні-орієнтовані Mesh-рішення (Zigbee, Thread, 6LoWPAN) [7, 14]	Використання вбудованих механізмів маршрутизації в IoT-стандартах	Практична придатність, сумісність із реальними IoT-пристроями	Обмежена універсальність, залежність від конкретної технології

ній простоті та стандартизованості, проте вони не завжди забезпечують ефективне балансування навантаження в Mesh-мережах. Балансувальні підходи дозволяють підвищити тривалість функціонування мережі за рахунок рівномірного використання ресурсів вузлів, однак можуть призводити до збільшення затримок передачі. Інтелектуальні методи демонструють найвищий потенціал адаптивності та багатокритеріальної оптимізації, але їх практичне застосування обмежується обчислювальними ресурсами IoT-пристроїв.

Узагальнено, що ефективна енергоефективна маршрутизація в Mesh-мережах Інтернету речей повинна враховувати не лише залишкову енергію вузлів, але й топологічні характеристики мережі, інтенсивність трафіку, якість каналів зв'язку та вимоги до

якості обслуговування. При цьому ключовим є досягнення компромісу між енергоефективністю, затримкою, надійністю та складністю реалізації алгоритмів.

Визначено, що перспективним напрямом розвитку є розробка адаптивних методів маршрутизації, які поєднують прості енергоорієнтовані механізми з елементами інтелектуального аналізу стану мережі, що дозволяє забезпечити ефективне функціонування IoT Mesh-мереж у реальних умовах експлуатації. Напрямок подальших досліджень полягає у створенні узагальнених моделей енергоефективної маршрутизації, здатних інтегрувати багатокритеріальні показники функціонування мережі, забезпечити адаптивність до змін середовища та бути придатними для реалізації на ресурсно обмежених пристроях Інтернету речей.

Список літератури:

1. Akkaya K., Younis M. A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*. 2005. Vol. 3(3). P. 325–349. DOI: 10.1016/j.adhoc.2003.09.010.
2. Mansour M., Gamal A., Ahmed A. I., Said L. A., Elbaz A., Herencsar N., Soltan A. Internet of Things: A Comprehensive Overview on Protocols, Architectures, Technologies, Simulation Tools, and Future Directions. *Energies*. 2023. Vol. 16(8). Art. 3465. DOI: 10.3390/en16083465.
3. Heinzelman W. R., Chandrakasan A., Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. *Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*. IEEE. 2000. P. 1–10. DOI: 10.1109/HICSS.2000.926982.
4. Winter T., Thubert P., Brandt A., Hui J., Kelsey R., Levis P., Pister K., Struik R., Vasseur J., Alexander R. RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks. *RFC 6550*. IETF. 2012. DOI: 10.17487/RFC6550.
5. Kaur L., Kaur R. A survey on energy efficient routing techniques in WSNs focusing IoT applications and enhancing fog computing paradigm. *Global Transitions Proceedings*. 2021. Vol. 2(2). P. 520–529. DOI: 10.1016/j.gltp.2021.08.001.

6. Cilfone A., Davoli L., Belli L., Ferrari G. Wireless Mesh Networking: An IoT-Oriented Perspective Survey on Relevant Technologies. *Future Internet*. 2019. Vol. 11(4). Art. 99. DOI: 10.3390/fi11040099.
7. Connectivity Standards Alliance. *Zigbee Specification*. Revision 23. 15 March 2023. URL: <https://csa-iot.org/wp-content/uploads/2023/04/05-3474-23-csg-zigbee-specification-compressed.pdf>
8. Behera T. M., Samal U. C., Mohapatra S. K., Khan M. S., Appasani B., Bizon N., Thounthong P. Energy-Efficient Routing Protocols for Wireless Sensor Networks: Architectures, Strategies, and Performance. *Electronics*. 2022. Vol. 11(15). Art. 2282. DOI: 10.3390/electronics11152282.
9. Darabkh K. A., Al-Akhras M., Zomot J. N., Atiquzzaman M. RPL routing protocol over IoT: A comprehensive survey, recent advances, insights, bibliometric analysis, recommendations, and future directions. *Journal of Network and Computer Applications*. 2022. Vol. 207. Art. 103476. DOI: 10.1016/j.jnca.2022.103476.
10. Gaidhani A. R., Potgantwar A. D. A Review of Machine Learning-Based Routing Protocols for Wireless Sensor Network Lifetime. *Engineering Proceedings*. 2023. Vol. 59(1). Art. 231. DOI: 10.3390/engproc2023059231.
11. Del-Valle-Soto C., Rodríguez A., Ascencio-Piña C. R. A survey of energy-efficient clustering routing protocols for wireless sensor networks based on metaheuristic approaches. *Artificial Intelligence Review*. 2023. Vol. 56(9). P. 9699–9770. DOI: 10.1007/s10462-023-10402-w.
12. Abadi A. F. E., Asghari S. A., Marvasti M. B., Abaei G., Nabavi S., Savaria Y. Reinforcement-Learning-Based Energy Efficient Control and Routing Protocol for Wireless Sensor Networks. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 44123–44135. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3167058.
13. Zhang Y., Luo J., Hu H. (Eds.). *Wireless Mesh Networking: Architectures, Protocols and Standards*. CRC Press, 2007.
14. Thread Group. *Thread 1.3.0 Public Specification*. 2023. URL: <https://www.threadgroup.org/ThreadSpec>
15. Ogundile O. O., Alfa A. S. A survey on an energy-efficient and energy-balanced routing protocol for wireless sensor networks. *Sensors*. 2017. Vol. 17(5). Art. 1084. DOI: 10.3390/s17051084.
16. Shah R. C., Rabaey J. M. Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. 2002. DOI: 10.1109/WCNC.2002.993520.
17. Chen D., Varshney P. K. QoS Support in Wireless Sensor Networks: A Survey. *Proceedings of the International Conference on Wireless Networks (ICWN)*. 2004. Vol. 1. P. 227–233.
18. Tournier J., Lesueur F., Le Mouél F., Guyon L., Ben-Hassine H. A survey of IoT protocols and their security issues through the lens of a generic IoT stack. *Internet of Things*. 2020. Vol. 16. Art. 100264. DOI: 10.1016/j.iot.2020.100264.
19. Dritsas E., Trigka M. A Survey on Cybersecurity in IoT. *Future Internet*. 2025. Vol. 17(1). Art. 30. DOI: 10.3390/fi17010030.
20. Khan R., Khan S. U., Zaheer R., Khan S. Future Internet: The Internet of Things Architecture, Possible Applications and Key Challenges. *Proceedings of the 10th International Conference on Frontiers of Information Technology (FIT)*. IEEE. 2012. P. 257–260. DOI: 10.1109/FIT.2012.53

Yakymenko M.S., Bosko V.V., Boki A.R., Lysenko I.A., Meleshko Ye.V. METHODS OF ENERGY-EFFICIENT ROUTING IN MESH NETWORKS OF THE INTERNET OF THINGS

The article investigates modern methods of energy-efficient routing in mesh networks of the Internet of Things (IoT), operating under conditions of limited energy resources of nodes, dynamic topology, and increasing requirements for data transmission quality. The relevance of the study is обусловлена the need to extend the lifetime of IoT networks, reduce node energy consumption, and ensure stable data transmission in distributed environments.

The aim of the article is to systematize existing approaches to energy-efficient routing in IoT mesh networks, analyze their advantages and limitations, and identify перспективні directions for further development in this field. The study presents a classification of routing methods based on organizational principles and optimization criteria, including clustering-based, hierarchical (RPL-based), load-balancing, QoS-oriented, intelligent, and protocol-oriented approaches.

The analysis shows that clustering methods reduce energy consumption through data aggregation but are sensitive to the selection of cluster heads. RPL-based protocols are standardized and widely adopted; however, they do not always fully exploit the capabilities of mesh architectures. Load-balancing methods increase network lifetime by distributing traffic more evenly, though they may lead to higher transmission delays. Intelligent approaches, based on machine learning and swarm intelligence algorithms, demonstrate high adaptability but are limited by implementation complexity on resource-constrained devices.

The results indicate that effective energy-efficient routing in IoT mesh networks requires comprehensive consideration of energy, topological, and traffic-related characteristics of the network. It is determined that a promising research direction is the development of adaptive multi-criteria routing methods capable of balancing energy efficiency, reliability, and computational costs.

Keywords: IoT, mesh networks, wireless sensor networks, computer networks, routing, energy efficiency, clustering, load balancing, adaptive algorithms, QoS.

Дата першого надходження статті до видання: 16.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Ярошук Л.Д.<https://orcid.org/0000-0001-8441-6692>Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»**Савченко Т.В.**<https://orcid.org/0009-0003-3614-5885>Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

ЕКСПЕРТНІ МЕТОДИ ПІДТРИМКИ РІШЕНЬ В ЗАДАЧАХ РЕСУРСОЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЦТВА ФОСФОРНОЇ КИСЛОТИ

Статтю присвячено актуальній темі підвищення надійності та ресурсоефективності виробництва фосфорної кислоти термічним способом, теплові та масообмінні процеси якого відбуваються при високих температурах з речовинами, шкідливими для обладнання та довкілля. Задачі підвищення ефективності цього виробництва передбачено розв'язувати шляхом використання експертних емпіричних знань в математичному забезпеченні комп'ютерно-інтегрованих систем керування.

Проведено аналіз хіміко-технологічної системи в цілому та окремих технологічних об'єктів керування з метою виявлення в них причин нестаціонарності процесів, шкідливих речовин, аварійних станів, а також їх наслідків. Головні причини зазначених порушень технологічного регламенту, зазвичай, зразу не очевидні, натомість стан об'єктів у цей час потребує швидкого аналізу, класифікації, локалізації причин та прийняття рішень по їх усуненню. Без такої послідовності інтелектуальних процедур сама по собі констатація порушення ще не дозволяє швидко визначити оптимальний ланцюг пошуку та вибір корегувальних дій. Для виявлення та прогнозування найбільш загрозливих технологічних зон ризиків використано методи експертного оцінювання, зокрема ранжування. Для зазначеного виробництва запропоновано розглядати два основних напрямки порушень – порушення норм екологічної безпеки та зниження показників ресурсоефективності. Виконано формалізацію зв'язків між окремими технологічними порушеннями режимів виробництва фосфорної кислоти термічним способом. Вона базується на запропонованій структурно-параметричній схемі технологічної системи та досвіді експертів. Сформовано основу бази знань діагностувальної експертної системи, що сприяє зменшенню часу пошуку першопричин аварій та реалізації відновлюваних дій. Синтезовано автоматичну систему керування концентрації готової фосфорної кислоти на основі правил нечіткого висновку, що дозволяє дотримуватись умов до якості продукції за рахунок врахування властивостей сировини на вході бапти гідратизації-охолодження.

Ключові слова: фосфорна кислота, термічний спосіб виробництва, система експертного оцінювання, експертна система, база знань, система керування, нечітка система, нестаціонарність, ресурсоефективність, надійність.

Постановка проблеми. Сучасний стан розвитку хімічної промисловості, зокрема виробництва термічної фосфорної кислоти (ТФК) характеризується постійним зростанням вимог до ресурсоефективності та надійності комп'ютерно-інтегрованих технологічних систем. Критичними викликами у цій галузі є дотримання обґрунтованих режимних параметрів у кожному окремому технологічному об'єкті керування (ТОК) для виконання

планових завдань хіміко-технологічної системи (ХТС) у цілому. На цьому побудована основна ідея функціонування ISO-систем та різноманітних екологічних та соціальних систем розвитку людства (зокрема положення стратегії сталого розвитку, яка є об'єднавчою платформою для впровадження технологічних впливів людини на довкілля).

ХТС, які складаються з поширених типових процесів (і, відповідно, обладнання), мають

обґрунтовані й перевірені рішення з автоматичного та автоматизованого керування. Інша справа – виробництва, які використовують обладнання, що можна розглядати як певною мірою унікальне, з нестабільними режимами функціонування. Такі виробництва вимагають ретельного аналізу об'єктів для прийняття рішень (часто нетипових) щодо алгоритмів керування ХТС у цілому.

Сучасний рівень керування процесами технології ТФК має недостатню теоретичну підтримку через об'єктивні причини: інтенсивне тепловиділення при екзотермічній реакції окиснення фосфору, занадто різкі зміни фазового стану речовин, коливання тиску у форсунках, нестабільність хімічного складу сировини, неперервне зростанням корозійного шару на поверхнях теплообмінних апаратів, багатофазність та агресивність середовищ тощо. Сталі параметри налаштування регуляторів з класичними ПІД-законами в наведених умовах втрачають початкову оптимальність. Тому для поставлених завдань ресурсоефективності та надійності ХТС виникає об'єктивна потреба у впровадженні більш гнучких і перевірених досвідом вдалого використання системах керування, наприклад, з інтелектуальною підтримкою прийняття рішень (СК ІППР).

Актуальною проблемою цього дослідження є визначення способів підвищення ефективності виробництва ТФК шляхом дотримання заданих показників якості готового продукту, зменшення наднормових ресурсних втрат через порушення технології (аварійні ситуації) та негативного впливу на довкілля. Вирішення проблеми шляхом автоматизації гальмується тим, що традиційні аналітичні методи опису процесів в обладнанні технології ТФК не дозволяють отримувати адекватні та прості для керування математичні моделі. На жаль, алгоритми керування не передбачають глибокого аналізу причин можливих технологічних порушень, зв'язків між ними, а також активного залучення персоналу як з метою поточного корегування керувальних впливів, так і для цілеспрямованих дій по оцінюванню стану ХТС та попередженню аварійних ситуацій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фундаментальні аспекти технології та ідентифікація джерел викидів висвітлені у звіті US EPA [1], а питання енергоефективності камери згорання фосфору досліджено С. Зап та ін. [2]. Водночас більшість цих праць зосереджена на стаціонарних режимах, тобто без урахування динамічної деградації обладнання.

Методологічні основи управління ризиками, визначені стандартом ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013

[3], адаптуються до специфіки хіміко-технологічних систем через інтеграцію експертних методів з аналізом дерев відмов та аналізом небезпек HAZOP [4, 5]. Ефективність такого поєднання в межах функціонування ІСППР обґрунтована у роботі В. Кисельова [6]. Питання впровадження інтелектуальних систем у контури автоматизації та формалізації неструктурованих знань для подолання інформаційної невизначеності складних об'єктів ґрунтовно розглядаються у працях [7–9].

Дослідження J. B. Savkovic-Stevanovic та T. J. Ross [10, 11] доводять практичну ефективність застосування нечітких контролерів у ХТС, обґрунтовуючи доцільність використання нечіткої логіки як інструмента фільтрації шумів та компенсації інформаційної невизначеності.

Незважаючи на існування окремих методів інтелектуального керування та діагностики, саме для виробництва термічної фосфорної кислоти досі не розроблено систему підтримки прийняття рішень. Зокрема, потребують вирішення в реальному часі питання контролю показників якості продукту та оцінювання безпекового стану процесів, зокрема їх негативного впливу на довкілля.

Постановка завдання. Метою роботи є підвищення ресурсоефективності та надійності системи автоматизованого керування процесами виробництва термічної фосфорної кислоти шляхом створення інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень на основі емпіричних експертних знань.

Виклад основного матеріалу. Для визначення джерел підвищення ресурсоефективності та надійності потрібно уважно проаналізувати особливості конструкцій обладнання та фізико-хімічних основ процесів виробництва, яке прийнято розглядати як двостадійне.

Згідно із технологічною схемою (рис. 1), у електропечі 2 за температури 1500–1600 °С відбувається сублімація фосфору з шихти (кокс, фосфат та оксид кремнію подають з бункеру 1). Отримана парогазова суміш після очищення в електрофільтрі 3 надходить до конденсаторів 4 та 5, де пара фосфору конденсується під шаром води для запобігання самозайманню.

Друга стадія починається з подачі рідкого жовтого фосфору зі збірників 6 та 7 через відстійник 8 в камеру згорання 9, де за надлишку повітря відбувається його інтенсивне спалювання. Процес відбувається при температурах 1650–2760 °С, що забезпечує високий ступінь перетворення сировини на газоподібний фосфорний ангідрид (P_2O_5).

Утворений ангідрид спрямовують до башти

гідратації-охолодження (гідратора-абсорбера) 10, де відбувається завершальна гідратація та охолодження газоподібної фази P_2O_5 шляхом зрошення водою, що призводить до утворення кислотного туману.

Друга стадія виробництва визначається двома послідовними екзотермічними реакціями: власне окисненням фосфору та його подальшою гідратацією з утворенням концентрованої термічної фосфорної кислоти (H_3PO_4). Особливістю окиснення є високе питоме тепловиділення, що потребує керування витратами охолоджуючих потоків для стабілізації температурного профілю апарата, оскільки будь-яке відхилення може призвести до термічного пошкодження обладнання або зниження якості кінцевого продукту.

Готову кислоту з концентрацією в межах діапазону 75...85% відводять з нижньої частини гідратора-абсорбера 9 на склад, а решту після охолодження в холодильниках 10, 11 повертають у процес для зрошення апаратів. Газові потоки, що містять дрібнодисперсний кислотний туман, який не встиг абсорбуватися рідкою фазою через високу швидкість потоку або недостатню площу контакту, спрямовують на завершальний етап – демістинг (фільтрацію). Використання систем очищення 13, таких як електрофільтри або скрубери Вентурі, забезпечує сепарацію аерозолу з потоку димових газів.

Досліджувана ХТС має низку специфічних особливостей. Наприклад, екзотермічність, коли

реакція горіння фосфору супроводжується миттєвим виділенням значної кількості тепла, тому найменша затримка в надходженні води для охолодження може призвести до перегрівання газу. Багатофазність – одночасна присутність у башті гідратації газу, пари, кислотного туману кислоти та рідкої фази. Ці складові мають різні швидкості теплопередачі, що формує стохастичний характер властивостей ТОК, ускладнюючи прогнозування їх поведінки. Через агресивність середовища швидка корозія та утворення нальоту на поверхнях технічних засобів автоматизації (ТЗА) сприяють отримання хибних даних.

На основі аналізу ХТС визначено основні фактори й умови, що забезпечують якість ТФК та екологічну безпеку: температурна стабільність у камері згорання, оптимальне співвідношення між витратами кисню й фосфору, рівномірність та стабільність розпилення фосфору та води, температура, витрата води та концентрація ангідриду на вході у БГО, а також стабільність напруги в електрофільтрі.

Проте реалізація цих вимог ускладнюється наявністю зовнішніх і внутрішніх джерел збурення. Так, фізико-хімічні властивості жовтого фосфору стають нестабільними внаслідок варіативності складу мікродомішок, а також залежності в'язкості розплаву від температури, що викликає зміни дисперсності розпилення та умов горіння. Стан внутрішнього середовища апаратів також характеризується динамічною мінливістю через

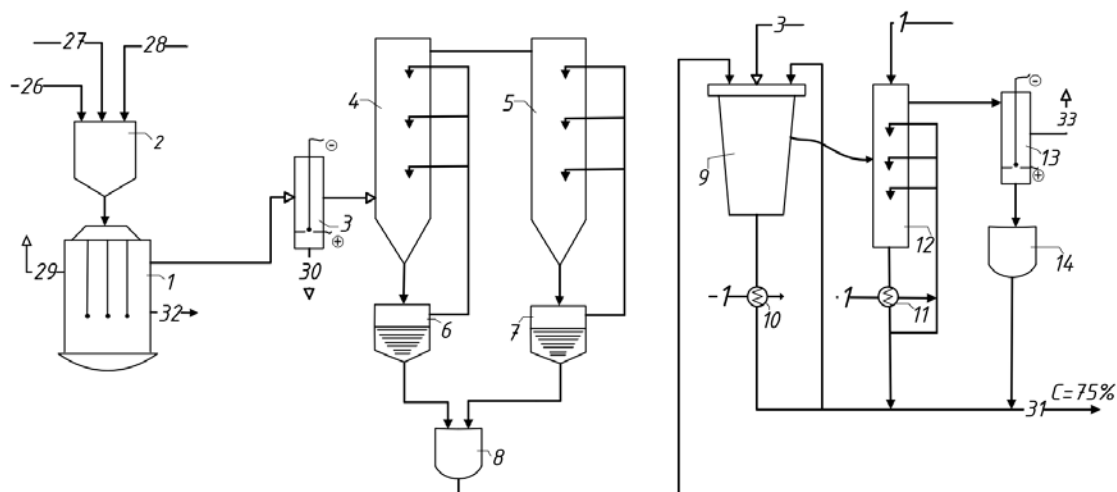


Рис. 1. Технологічна схема виробництва термічної фосфорної кислоти:

1 – бункер, 2 – електропіч, 3, 13 – електрофільтри, 4 – конденсатор-промивач гарячий, 5 – конденсатор-промивач холодний, 6, 7, 14 – збірники, 8 – відстійник, 9 – башта згорання, 10, 11 – холодильники, 12 – башта гідратації-охолодження.

Потоки: 1 – вода, 3 – повітря, 26 – кокс, 27 – фосфат, 28 – оксид кремнію, 29 – оксид вуглецю, 30 – пил, 31 – фосфорна кислота, 32 – шлаки, 33 – газ

суттєву корозію стінок та поступове наростання шару осаду на поверхнях теплообміну. Отже, стан кожного з апаратів ХТС можна вважати у загальному випадку нестационарним, тобто погано визначеним для прийняття керувальних рішень. Неконтрольована нестационарність може стати причиною порушень технологічного регламенту й призводити до аварійних ситуацій.

З метою обґрунтування задач та структури відповідної СК ІППР було розроблено структурно-параметричну схему ХТС з ідентифікацією кожного з апаратів, матеріальних потоків та показників властивостей (фрагмент СПС з ідентифікаторами стосовно однієї з башт гідратації – охолодження, БГО1, зображено на рис. 2). Уведено наступні ідентифікатори потоків, апаратів та змінних: КЗ1, ЕФ1 – камера згоряння та електрофільтр відповідно; $T_{\text{БГО}}$ – температура в середині башти гідратації, $S_{\text{пов}}$, $D_{\text{кр}}$ – характеристики стану внутрішніх поверхонь та дисперсності розпилення в середині башти гідратації; $Q_{\text{фа}}$, $F_{\text{фа}}$, $T_{\text{фа}}$ – концентрація, витрата та температура P_2O_5 відповідно; $Q_{\text{фкп1}}$, $F_{\text{фкп1}}$ – концентрація, витрата ТФК на склад відповідно; $Q_{\text{фк}}$, $F_{\text{фк}}$ – концентрація, витрата ТФК з вмістом газу відповідно; $F_{\text{в}}$, $T_{\text{в}}$, $P_{\text{в}}$ – витрата, температура та тиск води відповідно [1, 2].

Зазначені властивості об'єктів керування у виробництві ТФК показують, що порушення заданих умов функціонування процесів мають достатню кількість причин, проявів (брак, зни-

ження продуктивності, вихід з ладу обладнання) і наслідків. Тому дуже важливо мати систему узгоджених алгоритмів, які дозволяють:

- визначати та прогнозувати найбільш критичні зони ХТС для спрямування туди відповідних ресурсів та виконання захисних дій;
- при визнанні факту порушення технологічного режиму визначати його першопричини, ланцюги наслідків, а також рекомендації по усуненню першопричин.

Враховуючи перманентну нестационарність ХТС, треба періодично уточнювати актуальну критичну зону (зону загроз). Поточне визначення такої зони ХТС запропоновано визначати методами експертного оцінювання (ранжування), згідно до яких отримують та математично обробляють думки кваліфікованого персоналу.

Було визначено два типи критичних зон найбільш важливі з точки зору екологічної безпеки та з точки зору ресурсозбереження.

До переліку об'єктів ранжування за типом *екологічної безпеки* було внесено електрофільтр першої стадії, що очищує газоподібний фосфор після спалювання, електрофільтр другої стадії для вловлювання кислотного туману та башту гідратації-охолодження, де безпосередньо утворюється готова продукція. В дослідженні були враховані дані про концентрації часток P_2O_5 та H_2O , об'єми викидів, ГДК, а також інформація про періоди між забиваннями фільтрів та трудомісткості їх обслуговування.

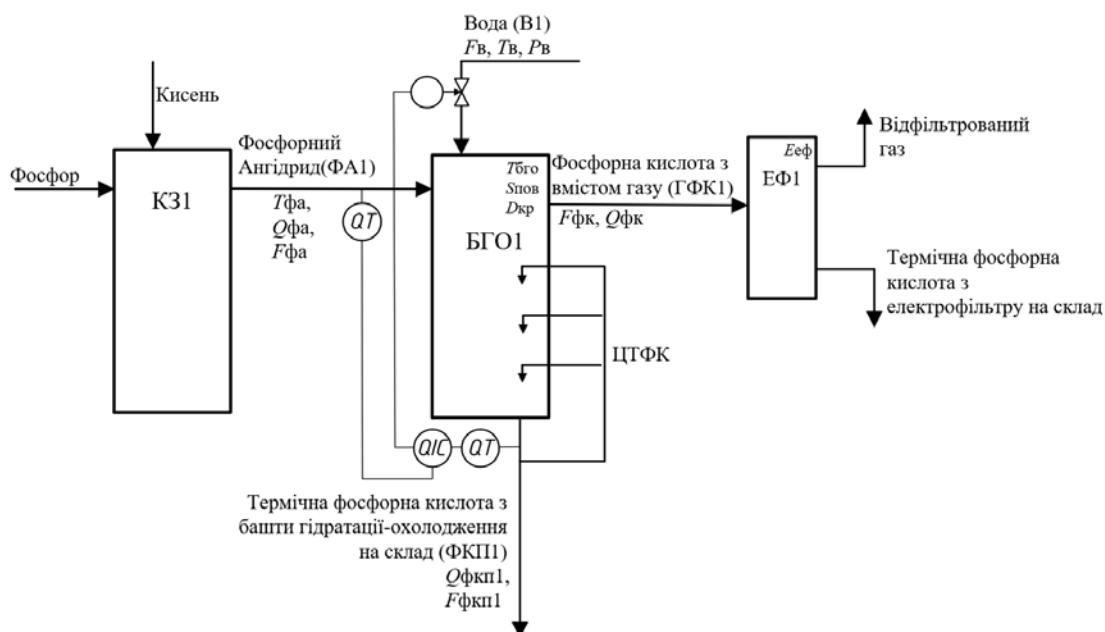


Рис. 2. Структурно-параметрична схема для БГО1 з контуром керування якістю ТФК

Нормальна матриця ранжування (табл.1) за одночасним методом (чим більше шкоди від роботи апарата, тим менший його ранг) показала, що найбільш критичним об'єктом є електрофільтр другої стадії.

Таблиця 1

Нормальна матриця ранжування апаратів

Експерти, $j = 1,5$	Вхідні змінні (фактори), $j = 1,3$		
	1 (електро- фільтр)	2 (електро- фільтр)	3 (башта гідратації)
1	1,5	1,5	3
2	1	2	3
3	3	1,5	1,5
4	2	2	2
5	3	1,5	1,5
Σрангів	10,5	8,5	11

Для підвищення ефективності дослідження додатково було проведено оцінювання компетентності експертної групи за критеріями стажу та кваліфікації, що дозволило розрахувати вагові коефіцієнти думки кожного фахівця. Після проведення корекції результатів із урахуванням компетентності експертів електрофільтр другої стадії підтвердив статус найбільш проблемного апарату за рівнем шкідливості викидів.

Для обґрунтованості висновків додатково була застосована ще одна система експертного оцінювання – попарного ранжування, яка базується на протилежному принципі вибору важливішого чинника (чим більше шкоди від роботи апарата, тим більший його ранг). Результати обох систем ранжування з врахуванням компетентностей та без нього виявили однакові тенденції у силі впливу факторів.

На основі аналізу теоретичних положень [2] та експертного опитування як найважливішу критичну зону ХТС з точки зору **ресурсоефективності** було визнано башти гідратації-охолодження.

Отримані результати ранжування стали науковим підґрунтям для створення дерева відмов та розробки інтелектуальних алгоритмів стабілізації технологічного процесу. Задача пошуку першопричин аварій та ланцюгів наслідків розв'язувалася на основі методики створення бази знань ЕС діагностувального типу [7]. Фрагмент таблиці, яка дозволяє з'єднувати факти окремих аварій, наведено у табл. 2.

Для системного оцінювання цих ризиків та обґрунтування структури керування у статті враховано методологію ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013. Згідно з положеннями стандарту щодо аналізу складних систем з високим рівнем невизначеності, було застосовано комбінацію методу *FTA (Fault Tree Analysis)* – аналіз дерева аварійних ситуацій, ДАС) та експертних оцінок. На рис.3 зображено фрагмент ДАС для виробництва фосфорної кислоти.

До аварійних ситуацій виробництва термічної фосфорної кислоти належать наступні факти: погіршення показників якості продукції (за потреби – брак), зниження тиску (розгерметизація обладнання), перевищення ГДК шкідливих речовин, критичні значення режимних параметрів в апаратах тощо.

Традиційні ПД-регулятори в умовах експлуатаційного зносу обладнання та постійної нестабільності вхідних потоків сировини демонструють незадовільну якість перехідних процесів [11]. Це зумовлено тим, що лінійні структури стандартних регуляторів не здатні адаптуватися до суттєвої нелінійності хіміко-технологічних процесів та відчутного дрейфу характеристик теплообмінних поверхонь. Відповідно до концепції Т. Росса [12], у ситуаціях, коли інформація про стан процесу є неповною через агресивність середовища, використання жорстко налаштованих коефіцієнтів регулювання стає джерелом додаткових ризиків керування.

Дослідження [2] підтверджують, що найбільш ймовірною критичною подією ХТС є відхилення концентрації H_3PO_4 на виході БГО за межі припус-

Таблиця 2

Фрагмент бази знань системи підтримки прийняття рішень для БГО

№ п/п	Ідентифікатор	Один. вимір.	Припустимі межі (верхня/нижня)	Ознака порушення	Наслідок порушення			Імовірн. Наслідку, %
					Ідентифікатор	Один. вимір.	Ознака поруш.	
1	Qфа	%	25	< 25	Qфкп1	%	< 73	85
			30	> 30			> 80	85
2	Qфа	%	25	< 25	Qфк	°C	< 73	85
			30	> 30			> 80	80
3	Fфа	м³/год	0.53	< 0.53	Fфк	м³/год	< 0.2	60
			0.59	> 0.59			> 0.4	60
...	...	...	...	...	...	...	...	...

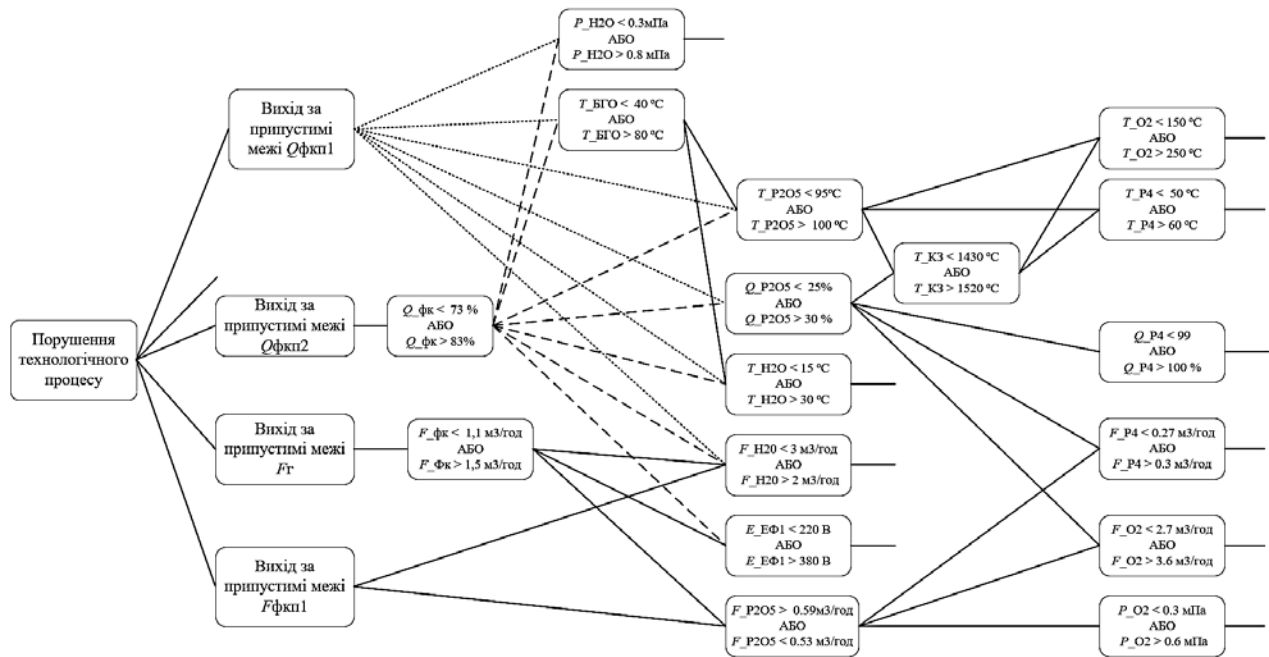


Рис. 3. Фрагмент дерева аварійних ситуацій для виробництва фосфорної кислоти:
 Q – концентрація, F – витрата, T – температура, P – тиск, E – напруга; фкп2 – потік фосфорної кислоти з ЕФ1, г – потік відфільтрованого газу

тимого діапазону, спричинене нестабільністю температури води та концентрації P_2O_5 вхідних речовин. Впровадження нечіткої автоматичної системи керування (НчАСК) концентрації H_3PO_4 на виході БГО (рис. 2) у цьому контексті розглядається як інструмент попередження аварійних ситуацій та зниження ризику до прийнятного рівня (принцип *As Low As Reasonably Practicable*, ALARP). Контур системи керування концентрації термічної фосфорної кислоти на виході з башти гідратації-охолодження ($Q_{H_3PO_4}$), наведено на рис. 2.

Вхідними змінними нечіткого контролера є концентрація фосфорного ангідриду у речовині на вході в башту гідратації-охолодження ($Q_{P_2O_5}$) та концентрація термічної фосфорної кислоти у її потоці на виході з башти гідратації-охолодження ($Q_{H_3PO_4}$). Керувальна дія (вихідна змінна) – витрата води (F_{H_2O}). На рис. 4 наведено графіки функцій належності для лінгвістичної змінної $Q_{P_2O_5}$. Практичне застосування системи дає змогу ефективно компенсувати стохастичні збурення, підтримуючи стабільну концентрацію кислоти на рівні 80% з мінімальним відхиленням.

Сформовано продукційні правила НчАСК. Одне з правил має вигляд:

ЯКЩО Концентрація P_2O_5 «висока» та Концентрація H_3PO_4 «низька», **ТО** Витрата води повинна бути «висока».

Використання *Fuzzy Logic Toolbox* дозволило візуалізувати поверхню відгуку системи (рис.5) та перевірити доцільність рекомендацій (рис.6).



Рис. 4. Графік всіх функцій належності керувальної змінної «Концентрація P_2O_5 »

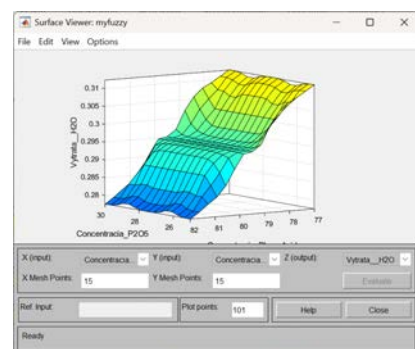


Рис. 5. Поверхня відгуку (Surface View) нечіткої системи керування

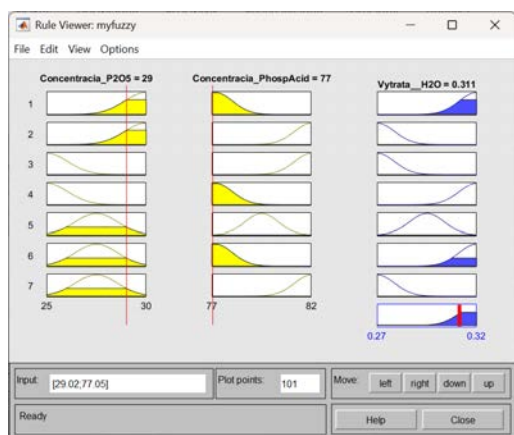


Рис. 6. Вікно програми перегляду роботи системи нечіткого висновку для значень входних змінних [29, 77]

Висновки. Предметом проведеного дослідження були процеси виробництва фосфорної кислоти термічним способом, а об'єктом дослідження – система керування з інтелектуальною підтримкою прийняття рішень, призначена для забезпечення ресурсоефективності виробництва. Як основні причини зниження ресурсоефективності були визначені порушення норм технологічного регламенту, що призводять до погіршення якості продукції, збільшення шкід-

ливих речовин та аварій із зупинкою обладнання. Запропоновано використовувати системи експертного оцінювання для поточних актуалізацій місць таких загроз в структурі ХТС. Виконано формалізацію зв'язків між окремими технологічними порушеннями режимів виробництва для формування бази знань аварійних ситуацій експертної системи. Запропонована нечітка автоматична система керування концентрації фосфорної кислоти після башти гідратації-охолодження зі врахуванням нестаціонарності властивостей потоку фосфорного ангідриду на вході в цю башту.

Наукова новизна дослідження полягає в об'єднанні трьох систем, побудованих на емпіричних знаннях, у цілісний контур, забезпечуючи комплексну інтелектуальну підтримку процесу автоматизованого керування.

Ця підтримка дозволяє впровадити більш глибокий підхід до моніторингу головних показників ХТС, обґрунтовано виконувати пошукові та відновлювані роботи після порушень, що має практичну цінність.

Отримані результати можуть бути використані для інших виробництв із небезпечними ресурсовитратними процесами та шкідливими речовинами.

Список літератури:

1. Source Category Survey: Thermal Process Phosphoric Acid Manufacturing Industry. US EPA, 1980. 120 p. (EPA-450/3-80-018). URL: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/910100YY.TXT> (дата звернення: 24.03.2026)
2. Zan C. et al. Evaluation method for thermal processing of phosphoric acid with waste heat recovery. *Energy*. 2006. Vol. 31. P. 2791–2804.
3. Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику (IEC/ISO 31010:2009, IDT) : ДСТУ IEC/ISO 31010:2013. [Чинний від 2014-07-01]. Київ: Мінекономрозвитку України, 2015. 73 с. URL: <https://wiki.nazk.gov.ua/wp-content/uploads/2020/10/UA-dstu-31010.pdf> (дата звернення: 24.03.2026).
4. Bogarin Geymayr J. A., Ebecken N. F. F. An expert system for fault tree analysis. *Artificial Intelligence in Engineering*. 1993. Vol. 1. P. 741–752.
5. Noriyati R. D. et al. Hazard and Operability Study and Risk Management Case Study: Phosphoric Acid Concentration Process. *International Journal of Engineering & Technology*. 2016. Vol. 16, No. 01. P. 20–26.
6. Кисельов В. Б. та ін. Модель попередження надзвичайних ситуацій в системі підтримки прийняття рішень на об'єктах критичної інфраструктури. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 36 (75), № 2. С. 98–103. doi: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/13>
7. Експертні методи в автоматизованих системах керування : Формування та напрями використання експертних знань : [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерноінтегровані технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Л. Д. Ярошук. – 2-ге вид., допов. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 43 с.
8. Чигур І. І., Чигур Л. Я. Огляд методів і напрямків розвитку технологій інтелектуальної підтримки прийняття рішень при автоматизації процесів керування. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2024. Т. 35 (74), № 3. С. 248–255. doi: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.1/35>
9. Субботін С. О. Подання й обробка знань у системах штучного інтелекту та підтримки прийняття рішень : навч. посіб. Запоріжжя : ЗНТУ, 2008. 341 с.
10. Savković-Stevanović J. B. A fuzzy logic controller for pH control of a chemical stirred tank. *Scientific Paper*. 1998. 66.012-52. URL: <https://scispace.com/pdf/a-fuzzy-logic-controller-for-ph-control-of-a-chemical-4qigirm359.pdf> (дата звернення: 24.03.2026)
11. Ross T. J. Fuzzy Logic with Engineering Applications. 3rd ed. John Wiley & Sons, Ltd, 2010. 607 p.

**Yaroshchuk L.D., Savchenko T.V. EXPERT DECISION SUPPORT METHODS
IN RESOURCE EFFICIENCY TASKS OF PHOSPHORIC ACID PRODUCTION**

The article is devoted to the relevant topic of improving the reliability and resource efficiency of thermal phosphoric acid production, where heat and mass transfer processes occur at high temperatures involving substances hazardous to both equipment and the environment. The tasks of increasing the efficiency of this production are proposed to be solved by incorporating empirical expert knowledge into the software and mathematical support of computer-integrated control systems.

An analysis of the chemical-technological system as a whole, as well as individual technological control objects, was conducted to identify the causes of process non-stationarity, hazardous substances, emergency states, and their consequences. The root causes of these technological deviations are usually not immediately apparent, while the state of the objects during such periods requires rapid analysis, classification, localization of causes, and decision-making for their elimination. Without such a sequence of intellectual procedures, the mere observation of a violation does not allow for the rapid determination of an optimal search chain or the selection of corrective actions. Expert evaluation methods, specifically ranking, were used to identify and predict the most critical technological risk zones. For the specified production, it is proposed to consider two main directions of violations: environmental safety breaches and a decrease in resource efficiency indicators. The formalization of connections between individual technological violations in thermal phosphoric acid production modes has been performed. It is based on the proposed structural-parametric diagram of the technological system and expert experience. The foundation of a diagnostic expert system's knowledge base has been formed, contributing to a reduction in the time required to search for root causes of accidents and implement recovery actions. An automatic control system for finished phosphoric acid concentration based on fuzzy inference rules has been synthesized, allowing for the maintenance of product quality standards by accounting for raw material properties at the inlet of the hydration-cooling tower.

Keywords: *phosphoric acid, thermal production process, expert evaluation system, expert system, knowledge base, control system, fuzzy system, non-stationarity, resource efficiency, reliability.*

Дата першого надходження статті до видання: 26.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026

Відомості про авторів

Абакумов Р.В. – ведучий інженер програмного забезпечення DispatchHealth Management, USA

Барковська О.Ю. – кандидат технічних наук, доцент кафедри електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки

Беглов К.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету «Одеська політехніка»

Белей О.І. – здобувачка вищої освіти кафедри комп'ютерних наук та програмної інженерії Херсонського державного університету

Близниченко О.М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна

Богдан Г.А. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бокій А.Р. – аспірант кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету

Бондаренко В.С. – здобувач вищої освіти кафедри електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки

Боряк К.Ф. – доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник науково-дослідного управління розвитку озброєння та військової техніки Військово-Морських Сил Науково-дослідного центру Збройних Сил України «Державний океанаріум» Інституту Військово-морських Сил Національного університету «Одеська морська академія»

Босько В.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету

Варганова Д.О. – старший викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

Волков Д.В. – аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення Національного університету «Одеська політехніка»

Гаврашенко А.О. – аспірант кафедри електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки

Газдюк К.П. – доктор філософії спеціальності інженерія програмного забезпечення, доцент, завідувач кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича

Гіоргізова-Гай В.Ш. – кандидат технічних наук, доцент кафедри системного проектування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Головенець М.І. – здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти кафедри електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки

Горба Д.О. – аспірант кафедри системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Гоюшова У.М. – аспірант, науковий співробітник Інституту математики

Гуйда О.Г. – кандидат наук з державного управління, професор, завідувач кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського

Демченко М.О. – кандидат технічних наук, доцент, старший викладач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Дичка І.А. – доктор технічних наук, професор, декан факультет програмних систем та прикладної математики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Єрошенко О.А. – доктор філософії, доцент, доцент кафедри електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки

Срьоміна Н.С. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри електронних обчислювальних машин, заступник декана факультету комп'ютерної інженерії та інформаційних систем Харківського національного університету радіоелектроніки

Згуровський Я.Ю. – аспірант кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Здольник М.О. – аспірант кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Зигін С.Є. – аспірант кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки

Зима І.В. – старший викладач кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету «Одеська політехніка»

Ігнатенко О.А. – начальник кафедри корабельної енергетики та електроенергетичних систем Інституту Військово-Морських Сил Національного університету «Одеська морська академія»

Ізмайлов А.В. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри комп'ютерних наук та інформаційних систем Карпатського національного університету імені Василя Стефаника

Кандиба І.О. – доктор філософії, старший викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Чорноморського національного університету імені Петра Могили

Кисельов В.Б. – доктор технічних наук, професор, директор навчально-наукового інституту муніципального управління та міського господарства Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського

Кобець В.М. – доктор економічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерних наук та програмної інженерії Херсонського державного університету

Колісник М.М. – кандидат наук з державного управління, доцент кафедри економічної кібернетики та управління економічною безпекою, доцент кафедри електронних обчислювальних машин (за сумісництвом) Харківського національного університету радіоелектроніки

Коломієць Р.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних технологій у медицині та телекомунікаціях Державного університету «Житомирська політехніка»

Корнієнко Б.Я. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; Київського національного університету імені Тараса Шевченка

Корнієнко Я.М. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри машин та апаратів хімічних та нафтопереробних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Короткіх В.М. – аспірант кафедри систем автоматизованого проектування Інституту комп'ютерних наук та інформаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

Кривуля Г.Ф. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки Харківського національного університету радіоелектроніки

Кузнєцов Е.Г. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри інформаційних технологій Сумського державного університету

Кухта О.П. – аспірант Національного лісотехнічного університету України

Ладієва Л.Р. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лакоза С.Л. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лисенко І.А. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення Центральноукраїнського національного технічного університету

Лисенко О.І. – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лисункін Д.Д. – здобувач вищої освіти кафедри інформатики і прикладного програмного забезпечення Державного університету економіки і технологій

Луфференко С.Л. – аспірант кафедри комп’ютерних наук Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій

Любченко В.В. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерії програмного забезпечення Національного університету «Одеська політехніка»

Люшенко А.М. – архітектор мобільних систем, експерт у проектуванні масштабованих мобільних та розподілених систем, магістр прикладної математики Одеського національного університету імені І.І. Мечникова

Лялікова Ю.В. – здобувачка вищої освіти кафедри інженерних систем та технологій Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Марченко О.І. – старший викладач кафедри інформатики та програмної інженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Медведєв Д.Г. – кандидат технічних наук, доцент кафедри інформатики і прикладного програмного забезпечення Державного університету економіки і технологій

Мелешко Є.В. – доктор технічних наук, професор, доцент кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення Центральноукраїнського національного технічного університету

Миронюк Ф.Ю. – здобувач вищої освіти Національного університету «Одеська політехніка»

Нестерук А.О. – доктор філософії, асистент кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Нечипуренко А.Г. – аспірант кафедри льотної експлуатації та безпеки польотів Української державної льотної академії

Нікітін В.С. – магістр з комп’ютерних наук кафедри системного проектування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Окунькова О.О. – старший викладач кафедри комп’ютерної інженерії та кібербезпеки Державного університету «Житомирська політехніка»

Олексій А.О. – доктор філософії, асистент кафедри програмного забезпечення комп’ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Олещенко Л.М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмного забезпечення комп’ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Омецинська Н.В. – кандидат технічних наук, доцент, завідувачка кафедри інженерних систем та технологій Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Онай М.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп’ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Пальоний А.С. – кандидат технічних наук, доцент, в.о. завідувача кафедри аеронавігації, метеорології та організації повітряного руху Української державної льотної академії

Партика С.О. – старший викладач кафедри електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки

Парфененко Ю.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій Сумського державного університету

Пивоварова Д.І. – асистент кафедри електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки

Пилипенко А.Г. – аспірант кафедри електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки

Пирог М.В. – асистент кафедри інформаційних систем та технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка

Півторак Д. О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп’ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Пірко І.Б. – кандидат фізико-математичних наук, доцент Національного лісотехнічного університету України

Полушко М.М. – Здобувач вищої освіти кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Превисокова Н.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних систем Карпатського національного університету імені Василя Стефаника

Пучков В.О. – аспірант кафедри програмного інженерії Національного університету «Одеська юридична академія»

Романенко О.О. – аспірант Криворізького національного університету

Рубан І.В. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки

Рудь А.В. – доктор філософії в галузі технічних наук, професор, завідувач кафедри агроінженерії та точного землеробства імені Михайла Самокиша Закладу вищої освіти «Подільський державний університет»

Рудь А.В. – доктор філософії зі спеціальності «Агрономія», асистент кафедри рослинництва, селекції та насінництва Закладу вищої освіти «Подільський державний університет»

Савіна О.О. – магістр кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Савченко Т.В. – здобувачка вищої освіти кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»

Семаньків М.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних систем Карпатського національного університету імені Василя Стефаника

Сиром'ятников М.В. – аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення Національного університету «Одеська Політехніка»

Скорик Є. В. – інженер-конструктор Акціонерного товариства «Науково-технічний комплекс «Електронприлад»»

Срібний О.І. – аспірант кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича

Степанець О.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сушук - Слюсаренко В.І. – старший викладач кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Тачиніна О.М. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри авіоніки та систем управління Державного університету «Київський авіаційний інститут»

Терейковський І.А. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Терещук Г.М. – асистент кафедри інформаційних систем та технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка

Ткачов В.М. – кандидат технічних наук, доцент, докторант кафедри електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки

Трунов В.О. – інженер Харківського національного університету радіоелектроніки

Федорченко В.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки; доцент кафедри інформаційних систем Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця

Філіппова М.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Фуртат О.В. – старший викладач кафедри інженерних систем та технологій Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Фуртат С.О. – викладач Відокремленого структурного підрозділу «Київський фаховий коледж міського господарства Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського»

Хіцко Я.В. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Хоцкіна В.Б. – доцент кафедри інформатики і прикладного програмного забезпечення, кандидат технічних наук Державного університету економіки і технологій

Чумаченко С.М. – доктор технічних наук, професор, Провідний науковий співробітник Державного науково-дослідного інституту авіації Міністерства оборони України

Шевченко В.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Штіфзон О.Й. – старший викладач кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Щербина І.С. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій

Юдін О.С. – здобувач вищої освіти кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Юрченко В.А. – магістрант кафедри електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки

Якименко М.С. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, завідувач кафедри вищої математики та фізики Центральноукраїнського національного технічного університету

Ярошук Л.Д. – кандидат технічних наук, доцент кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»

Науковий журнал

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Серія: Технічні науки

Том 37 (76) № 3 2026

Частина 1

Коректура • *Н. Славогородська*

Комп'ютерна верстка • *Н. Кузнєцова*

Адреса редакції:

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

м. Київ, вул. Джона Маккейна, 33

Електронна пошта: editor@tech.vernadskyjournals.in.ua

Сторінка журналу: www.tech.vernadskyjournals.in.ua

Формат 60×84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 32,44. Ум. друк. арк. 38,83.

Зам. № 0526/412. Наклад 150 прим.

Дата розміщення онлайн: 19.05.2026. Дата друку: 26.05.2026

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

65101, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1

Телефони: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

E-mail: mailbox@helvetica.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 7623 від 22.06.2022 р.