

ISSN 2786-5460 (Print)
ISSN 2786-5479 (Online)

МІЖРЕГІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ УПРАВЛІННЯ ПЕРСОНАЛОМ
INTERREGIONAL ACADEMY OF PERSONNEL MANAGEMENT



ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СУСПІЛЬСТВО

INFORMATION TECHNOLOGY AND SOCIETY

Випуск 1 (16), 2025
Issue 1 (16), 2025



Видавничий дім
«Гельветика»
2025

*Рекомендовано до друку Вченою радою
Міжрегіональної Академії управління персоналом
(протокол № 5 від 28 травня 2025 року)*

Інформаційні технології та суспільство / [головний редактор О. Попов]. – Київ : Міжрегіональна Академія управління персоналом, 2025. – Випуск 1 (16). – 292 с.

Журнал «Інформаційні технології та суспільство» є науковим рецензованим виданням, в якому здійснюється публікація матеріалів науковців різних рівнів у вигляді наукових статей з метою їх поширення як серед вітчизняних дослідників, так і за кордоном.

Редакційна колегія не обов'язково поділяє позицію, висловлену авторами у статтях, та не несе відповідальності за достовірність наведених даних і посилань.

Головний редактор: **Попов О. О.** – член-кор. НАН України, д-р техн. наук, професор, в.о. директора Центру інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики Національної академії наук України.

Редакційна колегія:

Василенко М. Д. – д-р фіз.-мат. наук, проф., професор кафедри кібербезпеки, Національний університет «Одеська юридична академія»; **Горбов І. В.** – канд. техн. наук, с.н.с., старший науковий співробітник, Інститут проблем реєстрації інформації НАН України; **Дуднік А. С.** – д-р техн. наук, доц., доцент кафедри мережних та інтернет технологій, Київський національний університет імені Тараса Шевченка; **Євсєєв С. П.** – д-р техн. наук, лауреат національної премії імені Патона 2024 р., професор кафедри кібербезпеки, Національний технічний університет «ХПІ»; **Зибін С. В.** – д-р техн. наук, доц., завідувач кафедри інженерії програмного забезпечення, Національний авіаційний університет; **Кавун С. В.** – д-р екон. наук, канд. техн. наук, проф., завідувач кафедри комп'ютерних інформаційних систем та технологій, Міжрегіональна Академія управління персоналом; **Комарова Л. О.** – д-р техн. наук, с.н.с., директор Навчально-наукового інституту інформаційної безпеки та стратегічних комунікацій, Національна академія Служби безпеки України; **Охріменко Т. О.** – канд. техн. наук, старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії протидії кіберзагрозам в авіаційній галузі, Національний авіаційний університет; **Рудніченко М. Д.** – канд. техн. наук, доц., доцент кафедри інформаційних технологій, Державний університет «Одеська політехніка»; **Скуратовський Р. В.** – канд. фіз.-мат. наук, доц., доцент кафедри обчислювальної математики та комп'ютерного моделювання, Міжрегіональна Академія управління персоналом; **Супрун О. М.** – канд. фіз.-мат. наук, доц., доцент кафедри програмних систем і технологій, Київський національний університет імені Тараса Шевченка; **Табунщик Г. В.** – канд. техн. наук, проф., професор кафедри програмних засобів, Національний університет «Запорізька політехніка»; **Фомін О. О.** – д-р техн. наук, доц., професор кафедри комп'ютеризованих систем управління, професор кафедри прикладної математики та інформаційних технологій, Державний університет «Одеська політехніка»; **Хохлячова Ю. С.** – канд. техн. наук, доц., доцент кафедри безпеки інформаційних технологій, Національний авіаційний університет; **Чолишкіна О. Г.** – канд. техн. наук, доц., доцент кафедри Інтелектуальних технологій, Київський національний університет імені Тараса Шевченка; **Чорний О. П.** – доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту електричної інженерії та інформаційних технологій, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського; **Юдін О. К.** – д-р техн. наук, проф., директор центру кібербезпеки Навчально-наукового інституту інформаційної безпеки та стратегічних комунікацій, Національна академія Служби безпеки України; **Гопеснко Віктор** – dr. sc. ing., проф., проректор з наукової роботи, директор навчальної програми магістратури «Комп'ютерні системи», Університет прикладних наук ISMA (Латвійська Республіка); **Leszczyna Rafal** – dr hab. inż., професор кафедри комп'ютерних наук у менеджменті, Гданський технологічний університет (Республіка Польща).

Реєстрація суб'єкта у сфері друкованих медіа:

Рішення Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення № 1173 від 11.04.2024 року.

Ідентифікатор медіа: R30-03890

Суб'єкт у сфері друкованих медіа – Приватне акціонерне товариство «Вищий навчальний заклад «Міжрегіональна Академія управління персоналом» (вул. Фрометівська, буд. 2, м. Київ, 03039, iart@iart.edu.ua, тел. (044) 490-95-00).

Мова видання: українська, англійська, німецька, французька та польська.

Періодичність видання: 4 рази на рік.

Відповідно до Наказу МОН України № 1290 від 30 листопада 2021 року (додаток 3) журнал включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія Б) зі спеціальностей F2 – Інженерія програмного забезпечення; F3 – Комп'ютерні науки; F4 – Системний аналіз та наука про дані; F5 – Кібербезпека та захист інформації; F6 – Інформаційні системи і технології; F7 – Комп'ютерна інженерія.

Усі електронні версії статей журналу оприлюднюються на офіційній сторінці видання
<http://journals.maup.com.ua/index.php/it>

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

*Recommended for publication
by Interregional Academy of Personnel Management
(Minutes No. 5 dated 28 May 2025)*

Information Technology and Society / [chief editor Oleksandr Popov]. – Kyiv : Interregional Academy of Personnel Management, 2025. – Issue 1 (16). – 292 p.

Journal «Information Technology and Society» is a peer-reviewed scientific edition, which publishes materials of scientists of various levels in the form of scientific articles for the purpose of their dissemination both among domestic researchers and abroad.

Editorial board do not necessarily reflect the position expressed by the authors of articles, and are not responsible for the accuracy of the data and references.

Chief editor: Oleksandr Popov – Corresponding Member of NAS of Ukraine, Doctor of Engineering, Professor, Acting Director of the Center for Information-Analytical and Technical Support of Nuclear Power Facilities Monitoring of the National Academy of Sciences of Ukraine.

Editorial Board:

Mykola Vasylenko – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Professor at the Department of Cybersecurity, National University «Odesa Law Academy»; **Ivan Horbov** – PhD in Engineering, Senior Research Associate, Senior Research Fellow, Institute for Information Recording of NAS of Ukraine; **Andrii Dudnik** – Doctor of Engineering, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of Networking and Internet Technologies, Taras Shevchenko National University of Kyiv; **Serhii Yevseiev** – Doctor of Engineering, laureate of the 2024 National Prize of Ukraine named after Borys Paton, Professor at the Department of Cybersecurity, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”; **Serhii Zybin** – Doctor of Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Software Engineering, National Aviation University; **Serhii Kavun** – Doctor of Economics, PhD in Engineering, Professor, Head of the Department of Computer Information Systems and Technologies Interregional Academy of Personnel Management; **Larysa Komarova** – Doctor of Engineering, Senior Research Scientist, Laureate of State Prize, Director of Educational-Scientific Institute of Information Security and Strategic Communications, National Academy of the Security Service of Ukraine; **Tetiana Okhrimenko** – PhD in Engineering, Senior Research Scientist at the Scientific Research Laboratory for Countering Aviation Cyberthreats, National Aviation University; **Mykola Rudnichenko** – PhD in Engineering, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of Information Technologies, Odessa Polytechnic State University; **Ruslan Skuratovskyi** – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of Computational Mathematics and Computer Modeling, Interregional Academy of Personnel Management; **Olha Suprun** – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of Software Systems and Technologies, Taras Shevchenko National University of Kyiv; **Halyna Tabunshchyk** – PhD in Engineering, Professor, Professor at the Department of Software Tools, “Zaporizhzhia Polytechnic” National university; **Oleksandr Fomin** – Doctor of Engineering, Associate Professor, Professor at the Department of Computerized Control Systems, Professor at the Department of Applied Mathematics and Information Technologies, Odessa Polytechnic State University; **Yuliia Khokhlachova** – PhD in Engineering, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of Information Technology Security, National Aviation University; **Olha Cholyshkina** – PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Intellectual Technologies, Taras Shevchenko National University of Kyiv; **Oleksii Chorny** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Educational and Scientific Institute of Electrical Engineering and Information Technologies, Kremenchuk National University named after Mykhailo Ostrogradskyi; **Oleksandr Yudin** – Doctor of Engineering, Professor, Director of the Cybersecurity Center of the Educational-Scientific Institute of Information Security and Strategic Communications, National Academy of the Security Service of Ukraine; **Hopeienko Viktor** – dr. sc. ing., Professor, Vice Rector for Research, Director of the study programme “Computer systems”, ISMA University of Applied Sciences (Republic of Latvia); **Leszczyna Rafal** – dr hab. inż., Profesor, Katedra Informatyki w Zarządzaniu, Politechnika Gdańska (Republic of Poland).

Registration of Print media entity:

Decision of the National Council of Television and Radio Broadcasting of Ukraine: Decision No. 1173 as of 11.04.2024.

Media ID: R30-03890

Media entity – Private Joint-Stock Company «Higher education institution «Interregional Academy of Personnel Management» (03039, Kyiv, Frometivska str., 2, iapm@iapm.edu.ua, tel. (044) 490-95-00).

Language of publication: Ukrainian, English, German, French, and Polish.

Periodicity: 4 times a year.

According to the Decree of MES No. 1290 (Annex 3) dated November 30, 2021, the journal was included in the List of scientific professional publications of Ukraine (category B) in specialties F2 – Software Engineering; F3 – Computer Sciences; F4 – Systems Analysis and Data Science; F5 – Cybersecurity and Data Protection; F6 – Information Systems and Technologies; F7 – Computer Engineering.

All electronic versions of articles in the collection are available on the official website edition
<http://journals.maup.com.ua/index.php/it>

The articles were checked for plagiarism using the software
StrikePlagiarism.com developed by the Polish company Plagiat.pl.

© Interregional Academy of Personnel Management, 2025
© Copyright by the contributors, 2025

ЗМІСТ

Maryna BAUTINA

MONITORING MACHINE LEARNING MODEL DRIFT IN PRODUCTION PIPELINES:
METHODS, METRICS, AND DEPLOYMENT CONSIDERATIONS 8

Ольга БОЙКО, Михайло ТАТАРЕНКО

МЕТОДИ СУПЕРРЕЗОЛЮЦІЇ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ДЕТАЛІЗАЦІЇ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ 16

Надія БОЛЮБАШ, Олександра ФІНЬКОВА

АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ СЕНСОРІВ ДЛЯ ПРОГНОЗНОГО ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЛІНІЙ ВАЖКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ 23

Денис БУКАТОВ, Яніна КОЛОДІНСЬКА, Ігор ФРОЛОВ, Олег РОМАНЕНКО

АКТУАЛЬНІ ЗАГРОЗИ ТА ЗАХИСНІ СТРАТЕГІЇ ДЛЯ ВІЗУАЛЬНОГО КОНТЕНТУ
В ІНТЕРАКТИВНИХ СИСТЕМАХ ІТ ПРОЄКТІВ.....41

Тетяна ВАКАЛЮК, Дмитро АНТОНЮК, Сергій ДУНЄВ, Олег ТАЛАВЕР, Ілля ДОВГАЛЮК

МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ
ДЛЯ РОЗРОБКИ ФІНАНСОВОГО ПОМІЧНИКА.....46

Артем ВАТУЛА

ОСНОВНІ МЕТОДИ МАШИННОГО НАВЧАННЯ В СИСТЕМАХ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ 52

Олексій ГРАЧОВ

PLANT MONITORING SYSTEM: ШІ-СИСТЕМА ДЛЯ РОЗУМНОГО МОНИТОРИНГУ РОСЛИН 59

Денис ДУБОВИК, Тетяна ДУБОВИК, Вадим МАТУС

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ КЕРУВАННЯ МАНІПУЛЯТОРОМ
З ПІДТРИМКОЮ WIFI ЗА ДОПОМОГОЮ КАМЕРИ 65

Тетяна ДУБОВИК, Данііл ІВАНИЦЬКИЙ, Ігор ЛЕВЧУК, Ганна ГУЗЬ, Олександр РОМАНЧУК

РОЗРОБКА НАЗЕМНОГО КЕРОВАНОВОГО ДРОНА ПІДВИЩЕНОЇ ПРОХІДНОСТІ З РАДІОКЕРУВАННЯМ 72

Владислав ІВАНОВ, Лідія ГОБИР, Тетяна ВАВРИК

ПЕРСПЕКТИВИ РЕАЛІЗАЦІЇ АВТОНОМНОГО УКРАЇНОМОВНОГО ГОЛОСОВОГО АСИСТЕНТА
НА ОСНОВІ МОВНОЇ МОДЕЛІ ТА ТЕХНОЛОГІЙ РОЗПІЗНАВАННЯ Й СИНТЕЗУ МОВЛЕННЯ 80

Артем КАМЕНСЬКИЙ, Віра БАБЕНКО

ДОСЛІДЖЕННЯ АКТУАЛЬНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ
ЯК СКЛАДОВОЇ ЧАСТИНИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ХІМІЧНОЇ ГАЛУЗІ 87

Андрій КОЛЯДА

СУЧАСНІ МОДЕЛІ РИЗИК-МЕНЕДЖМЕНТУ ІЗ СИСТЕМНИМ ПІДХОДОМ 93

Олена КОМІСАРЕНКО, Георгій БАРАНОВ, Дар'я МЕТЕЛЬСЬКА

СПЕЦІАЛЬНА ТЕХНІКА КЕРУВАННЯ ДИНАМІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ РОЗВИТКУ ВИРОБНИЦТВА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ПРОДУКТІВ ЗА ПОТРЕБ СОЦІАЛЬНИХ ЖИТТЄВИХ ЦИКЛІВ 99

Олексій КРИШАН, Олександр КОРЕНЬ, Всеволод БУДНІКОВ, Вікторія БИВШЕВА, Данило ШВЕД

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ПЛАТФОРМА ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ АГРОПРОМИСЛОВОЮ
ЕКОНОМІКОЮ НА ОСНОВІ CALS-ТЕХНОЛОГІЙ 109

Володимир ЛАВРИК, Владислава СКІДАН, Максим СУКАЛО, Антоніна ВОЛІВАЧ,**Юрій ЛЕБЕДЕНКО**

ВИКОРИСТАННЯ ІОТ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ МОНИТОРИНГУ СТАНУ РОСЛИН
В СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ 116

Маріанна МАРУСИНЕЦЬ

ВИКЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В РЕСПУБЛІЦІ ІРЛАНДІЯ 123

Олена МАРЧЕНКО

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ БЕЗПІЛОТНИМИ ПЛАТФОРМАМИ ДЛЯ ЗБОРУ
АГРАРНИХ ДАНИХ: АРХІТЕКТУРА, ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ 136

Ірина МИХАЙЛЮК, Ольга МУРАВА

ВПРОВАДЖЕННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС
ПРИ ВИВЧЕННІ ДИСЦИПЛІНИ «ОСНОВИ ПРОГРАМУВАННЯ МОВОЮ СІ» 145

Віктор ОБОДЯК, Михайло ОТРОЩЕНКО ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА МАШИННОГО НАВЧАННЯ В НАУКОМЕТРИЧНИХ СИСТЕМАХ ТА БАЗАХ ДАНИХ.....	151
Дмитро ПАВЛЮК, Олег БАЙБУЗ ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ АВТОМАТИЗОВАНОГО АНАЛІЗУ ТОНАЛЬНОСТІ ТЕКСТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ СУЧАСНИХ ВЕЛИКИХ МОВНИХ МОДЕЛЕЙ.....	157
Дмитро ПЕТРИНА, Олена КОРНУТА, Софія МЕЛЬНИК АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ГЕНЕРАТИВНИХ НЕЙРОМЕРЕЖ ДЛЯ ДИЗАЙН-ПРОЄКТІВ.....	165
Олексій ПІСКУНОВ, Наталя ТУПКО, Олександр ВАСИЛЬЄВ, Надія ТОПІХА ФОРМАЛЬНЕ ТЕСТУВАННЯ ФУНКЦІЙ ДІЙСНОГО АРГУМЕНТУ.....	174
Артем ПОДВИЖЕНКО, Антон ПЕРЕВЕРЗЄВ, Леонід ЛИТВИНЕНКО, Олег СКЛЯРЕНКО РОЛЬ КОНТЕЙНЕРИЗАЦІЇ ТА ВІРТУАЛІЗАЦІЇ НА РІВНІ ОПЕРАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ В РОЗВИТКУ ХМАРНО ОРІЄНТОВАНИХ ДОДАТКІВ.....	183
Олена ПОДКОВАЛІХІНА АНАЛІЗ ВПЛИВУ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ НА РОЗВ'ЯЗОК ЗАДАЧІ РОЗПОДІЛУ ІНВЕСТИЦІЙ У СФЕРІ ГОСПОДАРСЬКОЇ ДІЯЛЬНОСТІ.....	189
Ігор ШЕЛЕХОВ, Дмитро ПРИЛЕПА, Владислав АВЛАСОВИЧ, Олексій КОЛІСНИК МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ПРОЄКТУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ІЄРАРХІЧНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ В ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ.....	198
Олександр ПСАРЬОВ ІНТЕГРАЦІЯ МЕТОДІВ ОЦІНКИ БЕЗПЕКИ ЗАГАЛЬНОГО ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ЦІЛЕСПРЯМОВАНУ МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....	205
Світлана РЗАЄВА, Дарина ЧЕРНИШОВА МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ГЕНДЕРНОЇ РІВНОСТІ У ЗАКЛАДАХ ВИЩОЇ ОСВІТИ.....	213
Володимир РУДНИЦЬКИЙ, Віра БАБЕНКО, Сергій РУДНИЦЬКИЙ, Тимофій КОРОТКИЙ ГЕНЕРАЦІЯ ПОСЛІДОВНОСТІ НЕСИМЕТРИЧНИХ СЕТ-ОПЕРАЦІЙ З ТОЧНІСТЮ ДО ПЕРЕСТАНОВКИ ДРУГОГО ОПЕРАНДА.....	221
Андрій СЕРГАЧОВ, Денис ДУБОВИК, Тетяна ДУБОВИК РОЗРОБКА СПЕЦІАЛІЗОВАНОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ НА БАЗІ ARDUINO UNO «РОЗУМНА» АВТОПАРКОВКА.....	227
Тарас СКИЦЬКИЙ АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОСТОРОВИХ ОБЧИСЛЕНЬ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ У ПРИКЛАДНИХ ГАЛУЗЯХ.....	235
Сергій СТАСЕВИЧ, Олена ГОЛОДОВСЬКА ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ: ІСТОРІЯ ТА СТАНОВЛЕННЯ.....	242
Andrii STOPKIN THE USE OF A COLLECTIVE OF MOBILE AGENTS FOR THE EXPLORATION OF UNDIRECTED GRAPHS.....	249
Оксана ТИМОЩУК, Еміль ЛЮТФАЛІЄВ АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ТРАЄКТОРІЙ РУХУ АТМОСФЕРНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ЩОДО МОЖЛИВОСТІ ЇХ ПОКРАЩЕННЯ.....	256
Maksym TISHKOV, Oksana TYMOSHCHUK PEDESTRIAN SPEED ESTIMATION METHOD APPLICATION FOR STATISTICAL ANALYSIS OF CROWD DYNAMICS.....	263
Тетяна ЧІЛІКІНА, Ганна КАРНАУХОВА, Оксана ОРІХІВСЬКА, Яна ЗАГОРУЙКО РОЗРОБКА САЙТУ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ СВОЇМ РОЗКЛАДОМ ТА ЗАВДАННЯМИ.....	270
Людмила ШПОРТ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ МІЖБАНКІВСЬКИХ ПЛАТЕЖІВ, КОМПЛЕКСНА КРИПТОГРАФІЧНА АРХІТЕКТУРА.....	276
Олег БАРАБАШ, Андрій МУСІЄНКО, Ольга СВИНЧУК, Олексій ДУДКІН ОЦІНКА ЙМОВІРНОСТІ ЗВ'ЯЗНОСТІ СТРУКТУР ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ НА РІЗНИХ ГРАФОВИХ МОДЕЛЯХ.....	281

CONTENTS

Maryna BAUTINA MONITORING MACHINE LEARNING MODEL DRIFT IN PRODUCTION PIPELINES: METHODS, METRICS, AND DEPLOYMENT CONSIDERATIONS	8
Olga BOYKO, Mykhailo TATARENKO SUPER-RESOLUTION METHODS FOR IMPROVING THE DETAILS OF ULTRASOUND IMAGES.....	16
Nadiia BOLIUBASH, Oleksandra FINCOVA ANALYSIS OF SENSOR INDICATORS FOR PREDICTIVE MAINTENANCE OF HEAVY INDUSTRY PROCESS LINES	23
Denys BUKATOV, Yanina KOLODINSKA, Ihor FROLOV, Oleh ROMANENKO CURRENT THREATS AND PROTECTION STRATEGIES FOR VISUAL CONTENT IN INTERACTIVE IT PROJECT SYSTEMS.....	41
Tetiana VAKALIUK, Dmytro ANTONIUK, Serhii DUNIEV, Oleh TALAVER, Illia DOVGALIUK POSSIBILITIES OF APPLYING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES FOR DEVELOPING A FINANCIAL ASSISTANT	46
Artem VATULA MAIN METHODS OF MACHINE LEARNING IN DECISION SUPPORT SYSTEMS.....	52
Oleksiy HRACHOV PLANT MONITORING SYSTEM: AI SYSTEM FOR INTELLIGENT PLANT MONITORING	59
Denys DUBOVYK, Tetiana DUBOVYK, Vadym MATUS DEVELOPMENT OF A SOFTWARE PLATFORM FOR CONTROLLING A WIFI-ENABLED MANIPULATOR USING A CAMERA.....	65
Tetiana DUBOVYK, Daniil IVANITSKIY, Ihor LEVCHUK, Hanna HUZ, Oleksandr ROMANCHUK DEVELOPMENT OF A GROUND-BASED CONTROLLED OFF-ROAD DRONE WITH RADIO CONTROL.....	72
Vladyslav IVANOV, Lidia HOBYS, Tetiana VAVRYK DISCUSSING PERSPECTIVES OF DEVELOPMENT OF AN OFFLINE UKRAINIAN-SPEAKING LLM-BASED ASSISTANT INTEGRATED WITH SPEECH SYNTHESIS & RECOGNITION TECHNOLOGIES	80
Artem KAMENSKYI, Vira BABENKO RESEARCH ON THE RELEVANCE OF IMPLEMENTING THE INTERNET OF THINGS AS A COMPONENT OF AUTOMATION IN THE CHEMICAL INDUSTRY	87
Andrii KOLIADA MODERN RISK MANAGEMENT MODELS WITH A SYSTEMIC APPROACH.....	93
Olena KOMISARENKO, Georhii BARANOV, Daria METELSKA SPECIAL TECHNIQUE FOR MANAGING DYNAMIC PROCESSES OF DEVELOPMENT OF INTELLECTUAL PRODUCTS PRODUCTION ACCORDING TO THE NEEDS OF SOCIAL LIFE CYCLES	99
Oleksii KRYSHAN, Oleksandr KOREN, Vsevolod BUDNIKOV, Viktoriya BYVSHEVA, Danylo SHVED INTELLIGENT PLATFORM FOR OPTIMIZING MANAGEMENT OF AGRO-INDUSTRIAL ECONOMY BASED ON CALS TECHNOLOGIES.....	109
Volodymyr LAVRIK, Vladyslav SKIDAN, Maksym SUKALO, Antonina VOLIVACH, Yuriy LEBEDENKO USING IOT DEVICES TO MONITOR PLANT HEALTH IN AGRICULTURE.....	116
Marianna MARUSYNETS CHALLENGES AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE REPUBLIC OF IRELAND	123
Olena MARCHENKO AUTOMATED CONTROL SYSTEMS FOR UNMANNED PLATFORMS FOR AGRICULTURAL DATA COLLECTION: ARCHITECTURE, SOFTWARE, DEVELOPMENT PROSPECTS	136
Iryna MYKHAILIYK, Olha MURAVA INTEGRATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE INTO THE EDUCATIONAL PROCESS FOR TEACHING THE DISCIPLINE «FUNDAMENTALS OF PROGRAMMING IN C LANGUAGE».....	145

Viktor OBODIAK, Mikhailo OTROSHKENKO THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND MACHINE LEARNING IN SCIENTOMETRIC SYSTEMS AND DATABASES.....	151
Dmytro PAVLIUK, Oleh BAIBUZ EXPLORING THE CAPABILITIES OF AUTOMATED TEXT SENTIMENT ANALYSIS USING MODERN LARGE LANGUAGE MODELS	157
Dmytro PETRYNA, Olena KORNUTA, Sofia MELNYK ASPECTS OF USING GENERATIVE NEURAL NETWORKS FOR DESIGN PROJECTS	165
Oleksii PISKUNOV, Natalia TUPKO, Alexander VASILIEV, Nadiia TOPIKHA FORMAL TESTING OF REAL-VALUED FUNCTIONS.....	174
Artem PODVIZHENKO, Anton PEREVERZIEV, Leonid LYTVYNENKO, Oleh SKLIARENKO THE ROLE OF CONTAINERIZATION AND OS-LEVEL VIRTUALIZATION IN THE DEVELOPMENT OF CLOUD-NATIVE APPLICATIONS	183
Olena PODKOVALIHINA ANALYSIS OF THE IMPACT OF UNCERTAINTY ON SOLVING THE INVESTMENT ALLOCATION PROBLEM IN THE FIELD OF ECONOMIC ACTIVITY.....	189
Ihor SHELEHOV, Dmytro PRYLEPA, Vladyslav AVLASOVYCH, Oleksii KOLISNYK MODELS AND METHODS FOR DESIGNING INTELLIGENT HIERARCHICAL CONTROL SYSTEMS IN CHEMICAL ENGINEERING PROCESSES	198
Oleksandr PSAROV INTEGRATION OF GENERAL ARTIFICIAL INTELLIGENCE SAFETY ASSESSMENT METHODS INTO A TARGETED SOFTWARE DEVELOPMENT RISK MANAGEMENT MODEL.....	205
Svitlana RZAEVA, Daryna CHERNYSHOVA MODELING OF AN INFORMATION AND ANALYTICAL SYSTEM FOR MONITORING GENDER EQUALITY IN HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS	213
Volodymyr RUDNYTSKYI, Vira BABENKO, Serhii RUDNYTSKYI, Tymofii KOROTKYI GENERATING A SEQUENCE OF ASYMMETRIC CET OPERATIONS WITH AN ACCURACY OF UP TO THE PERMUTATION OF THE SECOND OPERAND	221
Andrii SERHACHOV, Denys DUBOVYK, Tetiana DUBOVYK DEVELOPMENT OF A SPECIALIZED COMPUTER SYSTEM BASED ON ARDUINO UNO «SMART» CAR PARKING.....	227
Taras SKYTSKYI ANALYSIS OF THE CURRENT STATE AND APPLICATIONS OF SPATIAL COMPUTING ACROSS VARIOUS FIELDS.....	235
Serhiy STASEVYCH, Olena HOLODOVSKA ARTIFICIAL INTELLIGENCE: HISTORY AND FORMATION.	242
Andrii STOPKIN THE USE OF A COLLECTIVE OF MOBILE AGENTS FOR THE EXPLORATION OF UNDIRECTED GRAPHS.....	249
Oksana TYMOSHCHUK, Emil LUTFALIEV ANALYSIS OF EXISTING METHODS FOR DETERMINING THE TRAJECTORIES OF ATMOSPHERIC AIRCRAFT FOR THE POSSIBILITY OF THEIR IMPROVEMENT	256
Maksym TISHKOV, Oksana TYMOSHCHUK PEDESTRIAN SPEED ESTIMATION METHOD APPLICATION FOR STATISTICAL ANALYSIS OF CROWD DYNAMICS.....	263
Tetyana CHILIKINA, Hanna KHARNAUKHOVA, Oksana ORIKHIVSKA, Yana ZAHORUIKO WEBSITE DEVELOPMENT FOR MANAGING YOUR SCHEDULE AND TASKS	270
Liudmyla SHPORT ENHANCING THE SECURITY OF INTERBANK PAYMENTS WITH, A COMPREHENSIVE CRYPTOGRAPHIC ARCHITECTURE.....	276
Oleg BARABASH, Andrii MUSIENKO, Olha SVYNCHUK, Oleksii DUDKIN ASSESSMENT OF THE PROBABILITY OF CONNECTION BETWEEN STRUCTURES OF INFORMATION SYSTEMS ON DIFFERENT GRAPH MODELS.....	281

UDC 004.8:004.051:004.738.5

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.1>**Maryna BAUTINA**

Master, Data Scientist, SoftServe

ORCID: 0009-0002-9617-9262

**MONITORING MACHINE LEARNING MODEL DRIFT IN PRODUCTION PIPELINES:
METHODS, METRICS, AND DEPLOYMENT CONSIDERATIONS**

Abstract. The relevance of the study is determined by the need to ensure the stability and effectiveness of machine learning models in the context of dynamic changes in data. The problem of model drift – changes in the statistical characteristics of input data or relationships between features and the target variable – leads to a decrease in prediction accuracy. Detecting and monitoring drift in real-time is crucial for maintaining the stability of models, particularly in fields such as finance, healthcare, and cybersecurity, where changes in input data or conditions can significantly affect model performance.

The aim of the paper is to investigate methods for monitoring model drift, particularly within the integration of CI/CD pipelines, to ensure their stability in real-world conditions. Special attention is paid to types of drift (data drift, concept drift, label drift) and the metrics used for their detection. The research methods include analyzing existing tools for monitoring and detecting changes in model behavior through the example of financial risk forecasting, as well as evaluating the effectiveness of integrating monitoring into CI/CD.

The scientific novelty lies in the proposed comprehensive approach to detecting drift and integrating monitoring into production pipelines using advanced tools such as Google Vertex AI, AWS SageMaker, and TensorFlow Extended, which allow automatic response to changes in data. The use of such technologies improves prediction accuracy and reduces errors in real-world environments. The study confirms the importance of integrating drift monitoring into the continuous process of updating and adapting models to maintain their effectiveness in the context of constantly changing data.

The conclusions show that integrating drift monitoring systems into CI/CD pipelines significantly improves the stability and effectiveness of models. Timely detection of drift allows for prompt model adjustments, reducing the likelihood of model degradation. It has been found that for achieving model stability, the automation of monitoring is crucial, as it allows for a prompt response to changes without manual intervention. This enhances the system's efficiency and reduces risks related to the deterioration of prediction quality.

Key words: drift monitoring, CI/CD pipelines, MLOps, model stability, automation, TensorFlow Extended, Google Vertex AI, AWS SageMaker, data drift, concept drift, label drift.

**Марина БАУТИНА. МОНІТОРИНГ ДРЕЙФУ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО НАВЧАННЯ В ПРОДУКЦІЙНИХ
ПАЙПЛАЙНАХ: МЕТОДИ, МЕТРИКИ ТА АСПЕКТИ РОЗГОРТАННЯ**

Анотація. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю забезпечення стабільності та ефективності моделей машинного навчання в умовах динамічних змін даних. Проблема дрейфу моделей – це зміна статистичних характеристик вхідних даних або залежностей між ознаками та цільовою змінною, що призводить до зниження точності прогнозів. Виявлення та моніторинг дрейфу в реальному часі є важливими для стабільної роботи моделей, особливо в таких галузях, як фінанси, охорона здоров'я, кібербезпека, де зміни вхідних даних або умов можуть значно вплинути на результативність моделей.

Метою статті є дослідження методів моніторингу дрейфу моделей машинного навчання, зокрема в рамках інтеграції в CI/CD пайплайни для забезпечення їхньої стабільності у реальних умовах. Особливу увагу приділено типам дрейфу (data drift, concept drift, label drift) та метрикам для їх виявлення. Методи дослідження включають аналіз існуючих інструментів для моніторингу та виявлення змін у поведінці моделей на прикладі фінансового прогнозування, а також оцінку ефективності інтеграції моніторингу в CI/CD.

Наукова новизна полягає у запропонованому комплексному підході до виявлення дрейфу та інтеграції моніторингу в виробничі пайплайни за допомогою передових інструментів, таких як Google Vertex AI, AWS SageMaker, та TensorFlow Extended, що дозволяє забезпечити автоматичне реагування на зміни в даних. Використання таких технологій підвищує точність прогнозів і зменшує кількість помилок у реальному середовищі. Дослідження підтверджує важливість інтеграції моніторингу дрейфу в безперервний процес оновлення та адаптації моделей для забезпечення їхньої ефективності в умовах постійно змінюваних даних.

Висновки показують, що інтеграція систем моніторингу дрейфу в CI/CD пайплайни значно покращує стабільність і ефективність моделей. Своєчасне виявлення дрейфу дозволяє оперативно коригувати моделі, що знижує ймовірність їх деградації. Виявлено, що для досягнення стабільності моделей важлива автоматизація моніторингу, який дозволяє оперативно реагувати на зміни без потреби в ручному втручанні. Це підвищує ефективність системи та знижує ризики, пов'язані з погіршенням якості прогнозів.

Ключові слова: моніторинг дрейфу, CI/CD пайплайни, MLOps, стабільність моделей, автоматизація, TensorFlow Extended, Google Vertex AI, AWS SageMaker, data drift, concept drift, label drift.

Problem statement. In today's context of widespread implementation of machine learning systems in production processes and services, the problem of ensuring the stability and reliability of their operation in a dynamic environment is of particular relevance. One of the critical threats to the quality of predictions of such models is the phenomenon of drift, i.e., a change in the statistical characteristics of input data or dependencies

between features and the target variable, which leads to a gradual decrease in the accuracy and reliability of the model. Drift can be caused by external factors such as changes in user behavior, market fluctuations, technological updates, and internal factors such as the accumulation of errors or imperfect initial training. Ignoring this process can lead to significant losses for businesses that rely on automated solutions, particularly in finance, healthcare, cybersecurity, logistics, and e-commerce.

The problem is the lack of a universal approach to detecting, measuring, and responding to model drift in the production environment. Most existing systems do not provide a built-in mechanism for monitoring model performance after its deployment, which makes it difficult to detect degradation of results early. In this context, the development and systematization of drift monitoring methods, selecting relevant metrics, and considering the infrastructural aspects of implementing such solutions in real-world conditions are of scientific importance. The study's practical significance is stipulated by the need to create adaptive systems that can identify drift and effectively manage the model's life cycle, ensuring its relevance, compliance with new conditions and minimizing business risks.

Analysis of the latest research and publications. The analysis of scientific research confirms that monitoring the drift of machine learning models in product pipelines covers three main areas: drift detection methods, monitoring metrics and architectures, and model deployment and maintenance aspects.

The first area covers developing and applying methods for detecting data and concept drift in machine learning. The work of D. Eastvedt, G. Naterer, and X. Duan demonstrated using a regression model to detect damage in subsea pipelines by monitoring flow changes. This allows for identifying deviations in hydraulic parameters in real-time [7]. S. Shankar and A. Parameswaran emphasize the concept of observability as a prerequisite for effective drift monitoring in ML systems, proposing the integration of internal and external signals of changes in model behavior [19]. J. Zenisek, F. Holzinger, and M. Affenzeller applied machine learning methods to detect concept drift in predictive maintenance tasks, emphasizing the effectiveness of classifiers sensitive to feature distribution changes [24]. N. Jourdan, T. Bayer, T. Biegel, and J. Metternich focus on deep learning architectures for detecting drift resulting from changes in process parameters during production [12]. S. Ackerman, E. Farchi, O. Raz, M. Zalmanovici, and P. Dube analyze the impact of drift and outliers on the long-term performance of models and propose methods to maintain the stability of forecasts [1]. It is advisable to complement this area by creating hybrid algorithms that integrate the detection of both data drift and changes in model concepts and responses.

The second direction concerns the creation of metrics, tools, and architectures for system monitoring of ML models. P. Kourouklidis, D. Kolovos, J. Noppen, and N. Matragkas propose a model-oriented approach to monitoring, including describing models at the meta-level and using specifications to automatically detect deviations in functioning [13]. B. Derakhshan, A. Rezaei Mahdiraji, T. Rabl, and V. Markl present an architecture for continuously deploying ML pipelines with built-in drift-checking steps as part of the CI/CD process [6]. A. Nandan Prasad describes the components of ML systems supervision within the framework of data governance: logging, alerts, and interpretation of performance changes [17]. D. Wani, S. Ackerman, E. Farchi, X. Liu, and H. Chang focus on the tasks of drift detection in log-analytic pipelines using time series and control over input data distributions [21]. P. Yadav, V. Singh, T. Joffre, O. Rigo, C. Arvieu, E. Le Guen, and E. Lacoste demonstrate an example of drift monitoring in a production system for selective laser melting, where inline monitoring methods are applied, and actual parameters are compared with predicted ones [22]. In their monograph, H. Hapke and C. Nelson systematize the construction of ML pipelines with the inclusion of monitoring mechanisms at all stages – from data collection to forecasting [11]. It is advisable to complement this area by unifying drift metrics, developing alert standards, and integrating Explainable AI tools to interpret the detected changes.

The third area covers deploying, maintaining, and adapting models in changing environments. Y. Yang, Y. Li, T. Zhang, Y. Zhou, and H. Zhang describe an approach to early detection of threats in pipeline systems based on a sensor network and ML models, which demonstrates the need to constantly adapt models to new types of signals [23]. B. C. Vadde and V. B. Munagandla study the transformation of DevOps in the context of ML, proposing implementing MLOps practices with a focus on model maintenance, drift testing, and version control [20]. B. Celik and J. Vanschoren present strategies for adapting AutoML to evolutionary changes in data, offering automatic selection of stable configurations [5]. It is advisable to complement this area by developing frameworks that combine technical scaling, automatic drift detection, and verification of compliance with business goals.

The general analysis shows that monitoring model drift in product ML systems requires an interdisciplinary approach that combines algorithmic methods, engineering practices, and management vision. Further research should be aimed at creating adaptive and transparent systems that can respond to environmental changes promptly without losing model accuracy and interpretability.

Despite significant advances in machine learning model drift detection, several unresolved issues exist. One of the main ones is the limitation of traditional metrics for detecting different types of drift, such as data drift, concept drift, and label drift, which limits the accuracy and timeliness of detecting model changes. In addition,

there is a lack of universal approaches to automatic drift monitoring within MLOps, which creates difficulties when integrating such systems into real-world CI/CD pipelines. Also, the issue of integrating drift monitoring into the continuous model updating process remains open, which is necessary for effective, scalable applications in a real environment.

The proposed research aims to develop new methods and tools for more accurate drift detection, real-time model adaptation, and integration into CI/CD pipelines. This will reduce the risks associated with model degradation and ensure their stability in the face of changing data, which is essential for the further development of science and practical applications in many fields such as finance, healthcare, and cybersecurity.

The purpose of the article is to study the possibilities and risks of using artificial intelligence in education from the perspective of data science to determine how to optimize its implementation, taking into account ethical, technological and social aspects.

To achieve this goal, the following tasks have been identified:

1. Analyze methods for detecting the drift of machine learning models, considering the types of changes (data drift, concept drift, label drift) and the effectiveness of using metrics in machine learning pipelines.
2. Explore approaches to automatic drift monitoring in MLOps, including adaptive model management in the production environment.
3. Determine the importance of continuous integration and delivery (CI/CD) for implementing drift monitoring mechanisms in a reliable and scalable environment.

Summary of the main material. In the process of using machine learning models in production environments, the problem of losing forecasting accuracy due to changes in the statistical characteristics of the data or the patterns in the subject area itself is becoming increasingly relevant. Such changes can be caused by gradual transformations in user behavior, changes in market conditions, technical updates, and random external events. In this context, the study of drift types and appropriate detection methods becomes a key aspect of ensuring the stability and reliability of models within the framework of learning pipeline machines. The most common types of drift are data drift (change in the distribution of input features), concept drift (change in the relationship between features and the target variable), and label drift (change in the distribution of the target variable). Various metrics are used to respond to these changes, including statistical distances, classification errors, and indicators of cluster stability or probability reduction in Bayesian models. Understanding the nature of each type of drift and applying the appropriate tools allows you to build an effective monitoring system in the face of dynamic data (Table 1).

In the current context of the practical use of machine learning models, particularly in automated forecasting systems, recommendation services, financial scoring, or fraud protection, each type of drift can have a different impact on model performance. For example, data drift is typical in e-commerce, where user behavior changes depending on seasons or external factors. In contrast, concept drift is more common in financial models due to changing economic conditions or the emergence of new types of transactions. In such cases, a monitoring system integrated into the MLOps infrastructure can use the above metrics to signal a decline in model quality.

Table 1

**Characteristics of machine learning model drift types,
methods of detecting them, and relevant metrics**

Type of drift	The nature of the data change	Main methods of detection	Examples of applied metrics
Data drift	Changing the distribution of input features without changing the mapping	Distribution analysis, histogram comparison	Kullback-Leibler Divergence, PSI, JS Divergence
Conceptual drift	Changing the relationship between the features and the target variable	Sliding windows, model reconstruction, ensembles	Accuracy decay, Page-Hinkley Test, DDM
Label drift	Changing the frequency or composition of classes in the labels	Monitoring the target variable, comparing frequencies	Hellinger Distance, Label Distribution Comparison

Source: compiled by the authors based on [1; 5; 21; 24]

This allows for timely re-training, adaptive updating, or recalculation of hyperparameters. The distribution of roles in drift detection is also important: developers are responsible for the built-in mechanisms, while DevOps specialists provide logging and transfer of signals to the relevant CI/CD processes. Thus, systematic drift detection based on the classification of its types and relevant metrics is the key to stable and controlled operation of models in real-world conditions.

Automatically detecting and monitoring model drift within the MLOps paradigm is a critical component of the modern machine learning model lifecycle. Once a model is deployed into a production environment,

its quality may change due to changes in input data, user behavior, or external context, resulting in reduced accuracy or disrupted decision-making logic. Therefore, MLOps as an engineering and management paradigm focuses not only on automating the deployment and updating of models but also on continuous monitoring of their performance. In this context, automatic drift monitoring involves the implementation of processes for collecting, processing, analyzing, and signaling changes in model behavior. Such processes are implemented with the help of specialized tools that integrate into data pipelines and interact with CI/CD systems, ensuring continuous control and adaptive model management based on defined thresholds. A key element of this process is the ability to respond in a timely manner, including retraining, updating hyperparameters, replacing the model, or correcting data. In practical terms, these functions are realized through the services of such companies as Google (Vertex AI Model Monitoring) [9], AWS (SageMaker Model Monitor) [3], Microsoft (Azure Monitor) [15], as well as through open-source frameworks such as Evidently AI [8], River [18], or Alibi Detect [2] (Table 2).

Table 2

Methods for automatic monitoring of machine learning model drift in MLOps and adaptive model management in the production environment

Platform / tool	Drift monitoring mechanism	Integration into MLOps / CI/CD	Support for adaptive response
Google Vertex AI	Automatic tracking of data/concept drift	Full integration with Vertex Pipelines and TFX	Notifications via Pub/Sub, automatic retraining
AWS SageMaker model monitor	Baseline-based monitoring of changes in distributions	Integration with SageMaker pipelines and cloudwatch	Events for Lambda or Step Functions
Microsoft azure monitor	Monitoring model performance via ML telemetry	Connection with Azure DevOps and ML lifecycle management	Manual or automated updates
Evidently AI	Web interface and API for drift monitoring	Embeds in any pipeline via Python SDK	Metrics, alerts, integration with Airflow/Kubeflow
Alibi detect / river	Statistical drift detection in streaming data	Suitable for edge or online environments	Real-time support, event flagging

Source: compiled by the authors based on [2; 3; 4; 8; 9; 15; 18]

The systems presented in Table 2 are developed by leading companies such as Google, AWS, Microsoft, and Meta AI and offer a variety of monitoring approaches to improve the reliability and efficiency of models in production environments.

For example, Google Vertex AI provides powerful tools for real-time model monitoring, including data and concept drift detection, and integrates with other Google Cloud components to provide full automation of pipelines [9]. The TensorFlow Extended (TFX) platform allows building scalable pipelines that include automatic detection of data changes, adaptive learning, and model updates, which ensures stability at all stages of the model cycle [10].

Amazon SageMaker Model Monitor is another powerful tool for automatic drift detection that compares current data distributions with baseline profiles to identify deviations, allowing timely model adjustments and preventing model degradation [3]. In particular, AWS Machine Learning Lens offers recommendations for building architectures for ML systems with built-in mechanisms for monitoring and responding to changes [4].

Microsoft Azure offers comprehensive solutions for model lifecycle management through Azure Machine Learning, including continuous monitoring and automatic model updates. The platform supports integration with Azure DevOps, which provides synergy between monitoring and CI/CD processes [15]. Additionally, Microsoft Responsible AI emphasizes the importance of adaptive model management with ethical standards, which helps to ensure the stability and correctness of model behavior in a changing environment [16].

Meta AI, on the other hand, uses Fully Sharded Data Parallel, which allows efficient management of large models and reduces the load on resources while maintaining the stability and accuracy of results even in the face of significant changes in input data [14].

Thus, the approaches presented in Table 2 reflect current practices in the automatic monitoring of model drift in the context of MLOps, allowing them to adapt and optimize models in the face of changing data and external factors, which is important to ensure their stable operation in the production environment.

Integrating drift monitoring is critical in today's continuous integration and delivery (CI/CD) environment for machine learning models. CI/CD mechanisms create an infrastructure that allows you to automatically update models, track their performance, and ensure stability in the face of changing data. This lets you quickly detect deviations from optimal model performance and take the necessary measures to maintain its reliability and efficiency. The practical example of using CI/CD for drift monitoring allows us to realize this idea through

an automatic process that includes constant updating, performance checking, and detection of changes in model behavior, which can significantly improve its stability in a real-world environment.

As part of the experimental study, a practical case of implementing drift monitoring of machine learning models in the financial sector was implemented. The business problem arose after the launch of a new loyalty program: the bank faced a sharp increase in the number of customers who fell into the risk zone, despite high predicted solvency indicators. This led to suspicions that the credit risk forecasting model was degraded. The study collected transactional data for the last 12 months, behavioral metrics (frequency of payments, regularity of spending, average amount), and basic demographic characteristics (age, region, income level). XGBoost's model was built on historical data with a «risky/non-risky customer» target. After its training, it was integrated into the CI/CD pipeline using TensorFlow Extended (TFX), and monitoring was implemented through Google Vertex AI. Table 3 shows a comparison of the tools used in the case study with a description of the monitoring methods and the results of their application.

Table 3

**Comparison of tools for monitoring model drift within CI/CD pipelines
and results of their use in the case study**

Tool description	Methods of drift monitoring	Approach to integration with CI/CD	Results of the experiment
Cloud-based platform for ML models and monitoring	Automatic detection of data and concept drift	Integration via Vertex Pipelines	Changes in the age distribution and behavioral patterns were detected, retraining was initiated
A platform for creating full-fledged ML pipelines	Tracking drift at the preparation and evaluation stages	CI/CD integration via TFX Pipelines	The model was updated to reflect the changes in features, and the history of changes was saved
AWS platform for ML models and distribution monitoring [3].	Comparison with the baseline profile, monitoring	Integration with AWS CodePipeline	Increase in drift errors confirmed, model replaced with a backup model, errors reduced

Source: compiled by the authors based on [3; 6; 9; 10; 17]

During the experiment, the performance of the model was monitored in a real environment for four months. Google Vertex AI [9] revealed a significant data drift: the share of young borrowers (under 30) increased by 18%, which affected the model's accuracy. Concept drift manifested itself in a change in the relationship between income and probability of default: customers with official average income became more likely to default after the launch of the deferred payment program. Label drift also occurred: the share of «risky» cases increased by 12% compared to the training sample [21].

Thanks to the integrated monitoring system, drift alerts were automatically generated, the process of re-training the model on updated data was initiated, and the model version in the production environment was automatically updated. After the update the average error rate in risk classification decreased by 15%.

This case study proved that in the absence of automated drift monitoring, the bank would have continued to make erroneous loan decisions, which could have led to increased financial losses. Instead, the CI/CD infrastructure with built-in monitoring made it possible to quickly adapt the model to new realities and avoid critical degradation of the quality of forecasts.

To better illustrate the process of model degradation and its improvement after automatic retraining, Figure 1 shows the change in the model's error rate over a four-month observation period. The data clearly reflect the growing performance deterioration caused by various types of drift and the subsequent recovery following the implementation of monitoring and CI/CD-based model updating. (fig. 1).

As shown in the chart, the model's classification error increased progressively from 22% to 28% over four months, reflecting a gradual decline in accuracy due to data drift (e.g., demographic shifts), concept drift (changes in feature-target relationships), and label drift. These changes remained undetected without monitoring and could have led to further forecasting errors. However, after automated retraining was triggered through Google Vertex AI and CI/CD pipelines, the error rate dropped to 12%. This confirms the effectiveness of integrated drift monitoring systems in stabilizing model performance and mitigating prediction risks in real-time production environments.

Detecting and interpreting machine learning model drift is accompanied by several challenges that limit the effectiveness of existing approaches. One of the main difficulties is the limitation of traditional metrics for drift detection. Many metrics, such as Kullback-Leibler divergence or Hellinger Distance, cannot accurately

capture model behavior changes under complex data changes [17]. They often focus only on superficial changes in the distribution of features, while changes in concepts or interdependencies between variables may be more critical.

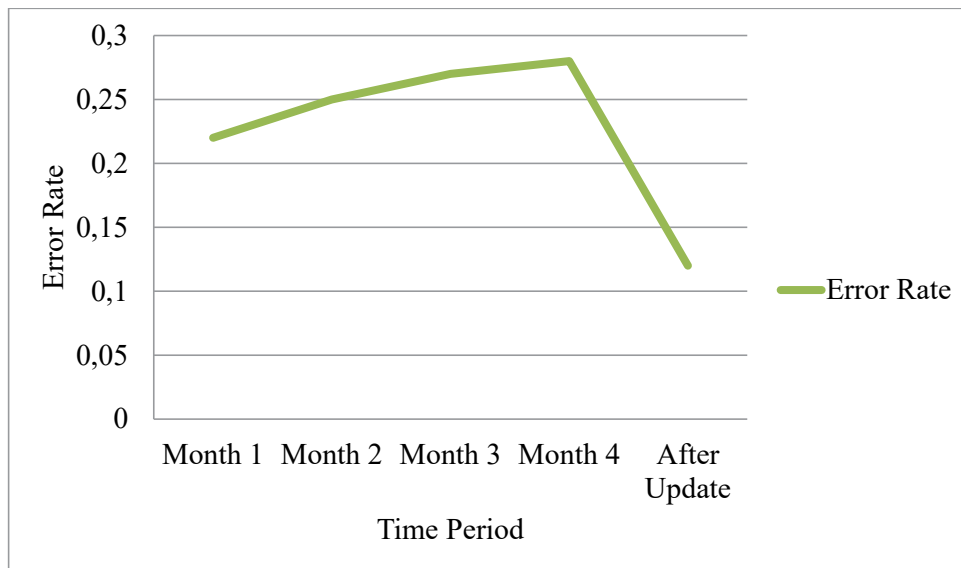


Fig. 1. Model Error Rate Over Time

Source: compiled by the author

Another problem is the difficulty of modeling changes in data, as they can be unpredictable and not always linear. Traditional models often do not consider contextual or cyclical changes, typical in financial or social systems where data may experience periodic fluctuations or spikes. This makes it difficult to develop adaptive algorithms that can instantly respond to these changes [13].

Finally, the absence of a single framework for the practical application of drift monitoring in complex environments changes the approach to integrating such systems into production environments. Existing tools do not always provide easy integration into CI/CD pipelines or have limited support for specific domains. This makes it difficult to create scalable, versatile solutions that can be adapted to different industries or model types.

Integrating a drift monitoring system into the machine learning model development cycle is a prerequisite for ensuring the reliability and stability of models in a real-world environment. This allows the timely detection of data changes and the adaptation of models to new conditions, which is important for their efficiency and accuracy. Within the modern CI/CD paradigm, it is important to automate the monitoring process so that the system can continuously monitor data and model performance without intervention from developers. Integration with CI/CD allows you to automatically update models to correct deficiencies without the need for manual intervention, significantly increasing work efficiency and reliability.

Drift monitoring in CI/CD involves using tools to detect changes in input data distribution or model behavior automatically. Detecting such changes is key to maintaining model stability in changing data. The use of specialized metrics to assess drift, such as changes in forecast accuracy or values of conceptual drift metrics, allows early detection of the need to retrain or optimize the model. An important aspect is the ability to automatically update models using built-in processes, such as retraining or adjusting hyperparameters, without the involvement of human resources, which increases the efficiency of the process.

Integrating monitoring into a single model management system is essential to ensure continuous quality control. CI/CD-enabled platforms allow you to automatically capture change history and set up testing and verification processes. This allows the quality of models to be controlled at all stages of their life cycle and promptly to changes in data or external conditions. In large data volumes and high processing time requirements, the system must scale and process data in real time, reducing delays and ensuring that models are updated promptly when drift is detected.

In general, the integration of drift monitoring into CI/CD pipelines creates the basis for building stable and adaptive machine learning models that can effectively respond to changes in data and maintain high accuracy of predictions in a dynamic environment.

Conclusions. The study confirmed that integrating drift monitoring into CI/CD pipelines is essential for maintaining machine-learning models' stability and accuracy under dynamic data change conditions. Based on a practical case in the banking sector, it was shown that timely detection of data, concept, and label drift enabled a rapid response to changes in customer behavior and preserved the reliability of risk assessment models.

The main challenges identified include the limitations of traditional metrics -such as Kullback-Leibler divergence and Hellinger Distance – which often fail to reflect complex behavioral shifts in data and the lack of universal frameworks for integrating monitoring tools into diverse production environments.

Future research should focus on developing improved monitoring algorithms and flexible integration solutions that support the real-time adaptation of models. Enhancing automated responses to data drift will ensure the long-term reliability of machine-learning systems.

The experimental results demonstrated that applying platforms like Google Vertex AI and TensorFlow Extended reduced classification errors by 15% by enabling automatic retraining and adjusting models in response to drift, highlighting the practical value of continuous monitoring mechanisms.

Bibliography:

1. Ackerman S., Farchi E., Raz O., Zalmanovici M., Dube P. Detection of data drift and outliers affecting machine learning model performance over time. *arXiv preprint*. 2020. arXiv:2012.09258. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2012.09258> (date of access: 04.04.2025).
2. Alibi Detect. *Explainable AI for Drift Detection and Model Monitoring*. 2025. URL: <https://github.com/SeldonIO/alibi-detect> (date of access: 03.04.2025).
3. Amazon Web Services. Amazon SageMaker Model Monitor. 2025. URL: <https://docs.aws.amazon.com/sagemaker/latest/dg/model-monitor.html> (date of access: 03.04.2025).
4. Amazon Web Services. *Machine Learning Lens – AWS Well-Architected Framework*. 2025. URL: <https://docs.aws.amazon.com/wellarchitected/latest/machine-learning-lens/wellarchitected-machine-learning-lens.pdf> (date of access: 03.04.2025).
5. Celik B., Vanschoren J. Adaptation Strategies for Automated Machine Learning on Evolving Data. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2021. Vol. 43, № 9. P. 3067–3078. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2021.3062900> (date of access: 04.04.2025).
6. Derakhshan B., Rezaei Mahdiraji A., Rabl T., Markl V. Continuous Deployment of Machine Learning Pipelines. *Proceedings of the International Conference on Extending Database Technology (EDBT)*. 2019. P. 397–408. URL: https://hpi.de/fileadmin/user_upload/fachgebiete/rabl/publications/2019/ContinuousMLDeploymentEDBT2019.pdf (date of access: 04.04.2025).
7. Eastvedt D., Naterer G., Duan X. Detection of faults in subsea pipelines by flow monitoring with regression supervised machine learning. *Process Safety and Environmental Protection*. 2022. Vol. 161, № 1. P. 409–420. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.03.049> (date of access: 04.04.2025).
8. Evidently AI. *Monitoring ML Models in Production*. 2025. URL: <https://evidentlyai.com> (date of access: 03.04.2025).
9. Google Cloud. Vertex AI: Model Monitoring. 2025. URL: <https://cloud.google.com/vertex-ai/docs/model-monitoring/using-model-monitoring> (date of access: 03.04.2025).
10. Google. *TFX: A TensorFlow-Based Production-Scale Machine Learning Platform*. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/1707.01967> (date of access: 03.04.2025).
11. Hapke H., Nelson C. *Building machine learning pipelines*. O'Reilly Media. 2020. 389 p. URL: https://books.google.com.ua/books?id=H6_wDwAAQBAJ (date of access: 04.04.2025).
12. Jourdan N., Bayer T., Biegel T., Metternich J. Handling concept drift in deep learning applications for process monitoring. *Procedia CIRP*. 2023. Vol. 120, № 1. P. 33–38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.08.007> (date of access: 04.04.2025).
13. Kourouklidis P., Kolovos D., Noppen J., Matragkas N. A Model-Driven Engineering Approach for Monitoring Machine Learning Models. *MODELS-C: ACM/IEEE International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems Companion*. 2021. P. 160–164. DOI: <https://doi.org/10.1109/MODELS-C53483.2021.00028> (date of access: 04.04.2025).
14. Meta AI. Fully Sharded Data Parallel: faster AI training with less GPU memory. 2025. URL: <https://engineering.fb.com/2021/07/15/open-source/fsdp/> (date of access: 03.04.2025).
15. Microsoft Azure. Model management and deployment concepts. 2025. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/machine-learning/concept-model-management-and-deployment> (date of access: 03.04.2025).
16. Microsoft. *Responsible AI Standard – White Paper*. 2025. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/ai/responsible-ai?activetab=pivot:techresources-tab> (date of access: 03.04.2025).
17. Prasad A. N. Monitoring and Maintaining Machine Learning Systems. In: *Introduction to Data Governance for Machine Learning Systems*. Apress, Berkeley, CA. 2024. P. 129–147. DOI: https://doi.org/10.1007/979-8-8688-1023-7_7 (date of access: 04.04.2025).
18. River. *Online Machine Learning in Python*. 2025. URL: <https://riverml.xyz> (date of access: 03.04.2025).
19. Shankar S., Parameswaran A. Towards observability for production machine learning pipelines. *arXiv preprint*. 2021. arXiv:2108.13557. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.13557> (date of access: 04.04.2025).
20. Vadde B. C., Munagandla V. B. DevOps in the Age of Machine Learning: Bridging the Gap Between Development and Data Science. *International Journal of Machine Learning Research in Cybersecurity and Artificial Intelligence*. 2024. Vol. 15, № 1. P. 530–544. URL: <https://www.researchgate.net/publication/388526732> (date of access: 04.04.2025).

21. Wani D., Ackerman S., Farchi E., Liu X., Chang H. Data Drift Monitoring for Log Anomaly Detection Pipelines. *arXiv preprint*. 2023. arXiv:2310.14893. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.14893> (date of access: 04.04.2025).
22. Yadav P., Singh V. K., Joffre T., Rigo O., Arvieu C., Le Guen E., Lacoste E. Inline drift detection using monitoring systems and machine learning in selective laser melting. *Advanced Engineering Materials*. 2020. Vol. 22, № 12. Article 2000660. DOI: <https://doi.org/10.1002/adem.202000660> (date of access: 04.04.2025).
23. Yang Y., Li Y., Zhang T., Zhou Y., Zhang H. Early safety warnings for long-distance pipelines: A distributed optical fiber sensor machine learning approach. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2021. Vol. 35, № 17. P. 14991–14999. DOI: <https://doi.org/10.1609/aaai.v35i17.17759> (date of access: 04.04.2025).
24. Zenisek J., Holzinger F., Affenzeller M. Machine learning based concept drift detection for predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*. 2019. Vol. 137, № 1. Article 106031. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106031> (date of access: 04.04.2025).

УДК 004.932.4:616-073.97

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.2>

Ольга БОЙКО

кандидат технічних наук, старший викладач кафедри інформаційних технологій, Сумський державний університет, o.boiko@cs.sumdu.edu.ua

ORCID: 0000-0001-8557-2267

Михайло ТАТАРЕНКО

аспірант кафедри комп'ютерних наук, Сумський державний університет, m.tatarenko98@gmail.com

ORCID: 0009-0000-9649-4620

МЕТОДИ СУПЕРРЕЗОЛЮЦІЇ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ДЕТАЛІЗАЦІЇ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Анотація. У роботі досліджено можливості застосування методів суперрезолюції для покращення просторової деталізації ультразвукових зображень у медичній діагностиці. Актуальність теми зумовлена обмеженнями апаратної роздільної здатності традиційних ультразвукових систем, що лімітує точність візуалізації дрібних анатомічних структур та ускладнює постановку клінічного діагнозу.

Метою статті є комплексне обґрунтування ефективності та доцільності впровадження методів суперрезолюції до ультразвукової діагностики шляхом системного аналізу їхніх технічних характеристик, механізмів підвищення якості реконструкції зображень та чинників, що впливають на можливості клінічного використання.

Методологію дослідження сформовано на основі узагальнення сучасних підходів до оптимізації архітектур моделей, підготовки вхідних даних, попереднього навчання та клінічної валідації результатів. Особливу увагу приділено порівняльному аналізу переваг трансформерних моделей, як-от SwinIR, у контексті медичної візуалізації.

У роботі охарактеризовано основні фактори втрати просторової деталізації в УЗ-зображеннях, систематизовано класифікацію методів суперрезолюції за технічними параметрами, проаналізовано організаційні бар'єри впровадження алгоритмів до клінічного середовища, а також розроблено обґрунтовані рекомендації щодо інтеграції таких рішень до медичної інфраструктури.

У результаті дослідження встановлено, що нейронні моделі суперрезолюції, зокрема архітектури на базі згортових мереж та трансформерів, мають високий потенціал підвищення якості УЗ-зображень без потреби в оновленні апаратного забезпечення. Виявлено ключові проблеми, пов'язані з нестачею маркованих УЗ-даних, складністю дотримання стандартів DICOM і PACS, а також етичними аспектами медичної відповідальності. У роботі доведено, що успішне впровадження методів суперрезолюції потребує адаптації алгоритмів до специфіки медичних систем, поетапної інтеграції до наявних ПЗ-рішень, збереження контролю лікаря та забезпечення відповідності нормативним вимогам.

Наукову новизну становить комплексний аналіз способів підвищення ефективності алгоритмів суперрезолюції в ультразвуковій візуалізації та визначення напрямів їхнього оптимального використання в медичній практиці.

Ключові слова: ультразвукова діагностика, просторове розрізнення, клінічна інтерпретованість, трансформерна модель, нейронна мережа.

Olga BOYKO, Mykhailo TATARENKO. SUPER-RESOLUTION METHODS FOR IMPROVING THE DETAILS OF ULTRASOUND IMAGES

Abstract. The paper investigates the possibilities of using super-resolution methods to improve the spatial detail of ultrasound images in medical diagnostics. The relevance of the topic is due to the limitations of the hardware resolution of traditional ultrasound systems, which limits the accuracy of visualization of small anatomical structures and complicates the clinical diagnosis.

The purpose of the article is to provide a comprehensive justification for the effectiveness and feasibility of introducing super-resolution methods into ultrasound diagnostics by systematically analyzing their technical characteristics, mechanisms for improving the quality of image reconstruction, and factors affecting the possibilities of clinical use.

The research methodology is based on the generalization of modern approaches to the optimization of model architectures, preparation of input data, pre-training and clinical validation of results. Particular attention is paid to a comparative analysis of the advantages of transformable models, such as SwinIR, in the context of medical visualization.

The paper characterizes the main factors of loss of spatial detail in ultrasound images, systematizes the classification of superresolution methods by technical parameters, analyzes organizational barriers to the implementation of algorithms in the clinical environment, and develops reasonable recommendations for the integration of such solutions into medical infrastructure.

The study found that neural models of superresolution, in particular, architectures based on convolutional networks and transformers, have a high potential for improving the quality of ultrasound images without the need to upgrade hardware. The key problems associated with the lack of labeled ultrasound datasets, the difficulty of complying with DICOM and PACS standards, and the ethical aspects of medical liability are identified. The paper proves that successful implementation of super-resolution methods requires adaptation of algorithms to the specifics of medical systems, gradual integration into existing software solutions, maintaining physician control, and ensuring compliance with regulatory requirements.

The scientific novelty is a comprehensive analysis of ways to improve the efficiency of superresolution algorithms in ultrasound imaging and to determine the directions of their optimal use in medical practice.

Key words: ultrasound diagnostics, spatial resolution, clinical interpretability, transformer model, neural network.

Вступ. Ультразвукова візуалізація є одним із найпоширеніших неінвазивних методів медичної діагностики, що забезпечує оперативність, безпечність і доступність обстеження. Однак через фізичні обмеження технології, зокрема низьку просторову роздільну здатність і наявність шумів, які спричинені розсіюванням хвиль і артефактами від тканинних структур, деталізація отриманих зображень часто є недостатньою для точного виявлення та класифікації патологій. У складних клінічних випадках це ускладнює прийняття рішень лікарями, особливо при діагностиці мікроскопічних змін, пухлин чи судинних патологій. У зв'язку з цим виникає необхідність у впровадженні сучасних комп'ютерних методів обробки зображень, здатних суттєво покращити якість візуалізації без зміни апаратної складової. Методи суперрезолюції, засновані на алгоритмах машинного навчання та глибоких нейронних мережах, відкривають нові можливості для відновлення високодеталізованих структур шляхом обробки низькоякісних зображень. Вони дозволяють моделювати втрачену інформацію з високою точністю, що значно підвищує ефективність виявлення патологій та точність діагностики. Таким чином, дослідження методів суперрезолюції у сфері медичної ультразвукової візуалізації має не лише теоретичну цінність, а й вирішує актуальні прикладні завдання сучасної медицини, спрямовані на підвищення якості діагностичних рішень і зменшення залежності результатів обстеження від людського чинника.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методи суперрезолюції для покращення деталізації ультразвукових зображень є одним із найдинамічніших напрямів розвитку медичної візуалізації. Аналіз сучасної наукової літератури дає змогу виокремити кілька ключових дослідницьких напрямів, що формують сучасну наукову картину та визначають вектори подальших розробок у цій сфері. Перший напрям досліджень пов'язаний із розвитком моделей глибокого навчання, орієнтованих на підвищення просторової деталізації ультразвукових зображень без втрати діагностичної достовірності. Група зарубіжних авторів H. Liu, J. Liu, S. Hou, T. Tao та J. Han розробили самонавчальну модель на основі CycleGAN, яка зберігає перцептивну узгодженість навіть без парних даних [10]. Дослідники Y. Zhang, S. Lu, C. Peng, S. Zhou, I. Campo, M. Bertolotto, Q. Li, Z. Wang, D. Xu, Y. Wang, J. Xu, Q. Wu, X. Hu, W. Zheng та J. Zhou використали глибоке навчання з елементами радіоміки для диференціації новоутворень, продемонструвавши високу чутливість [18]. Учені A. Sawant та S. Kulkarni довели ефективність застосування суперрезолюції в покращенні візуалізації структур низької контрастності [13]. Турецькі вчені H. Temiz та H. S. Bilge зосередилися на реконструкції B-mode зображень із використанням згорткових мереж, показавши здатність моделі зберігати контурні межі [16]. Цей напрям вимагає подальших досліджень з адаптації моделей до реальних клінічних сценаріїв, з урахуванням обмеженої кількості еталонних УЗ-даних і неоднорідності сигналу.

Другий напрям охоплює просторово-часову обробку зображень і розширення застосування суперрезолюції до відео та тривимірних структур. Китайські дослідники T. Liu, S. Han, L. Xie, W. Xing, C. Liu, B. Li та D. Та реалізували дифузійну модель, орієнтовану на відновлення природної текстури [11]. Група авторів Q. Chen, H. Song, J. Yu та K. Kim провели узагальнення сучасних методів суперрезолюції в УЗ-візуалізації та їхніх застосувань [2]. Італійські дослідники S. Cammarasana, P. Nicolardi та G. Patané показали ефективність обробки послідовностей 2D-відео УЗ, що має перспективу для моніторингових систем [1]. Автори D. Ghosh та K. Hoyt зосередили увагу на тривимірній локалізаційній мікроскопії, яка дозволяє візуалізувати мікросудинну мережу з надвисокою роздільністю [6]. У цьому напрямі доцільно зосередити увагу на уніфікації методів для реального часу, з урахуванням апаратних обмежень та потреб багатовимірної реконструкції.

Третій напрям стосується високошвидкісної обробки УЗ-зображень та автоматизованої реконструкції без еталонів. Група дослідників W. Choi, M. Kim, J. HakLee, J. Kim та J. BeomRa запропонували CNN-модель для високошвидкісної B-mode візуалізації з підвищеною деталізацією [3]. Науковці H. Liu, J. Liu, F. Chen та C. Shan використали прогресивне залишкове навчання з блоками пам'яті для реконструкції зображень низької якості [9]. Дослідники R. J. G. Van Sloun, O. Solomon, M. Bruce, Z. Z. Khaing, H. Wijkstra та Y. C. Eldar запропонували підхід до ультразвукової локалізаційної мікроскопії, що поєднує глибоке навчання й мікроскопічну точність [17]. Фахівці з ультразвукової діагностики O. Couture, V. Hingot, B. Heiles, P. Muleki-Seya та M. Tanter провели огляд методів ультразвукової суперрезолюції та сформулювали виклики, пов'язані зі стандартизацією та клінічною валідацією [5]. Подальші розробки у цьому напрямі мають зосереджуватися на стійкості моделей до шуму, інтерпретованості результатів та зниженні обчислювальної складності для клінічної інтеграції.

Четвертий напрям спрямований на альтернативні методи обробки, зокрема променеформування та стислу реконструкцію. Китайські вчені H. Song та Y. Yang використали метод ультразвукового променеформування з глибинним підсиленням для виявлення субхвильових дефектів [15]. Дослідники M. Hosseinpour, H. Behnam та M. Shojaeifard реалізували підхід тимчасової суперрезолюції на основі compressive sensing (стиснене сприйняття), який дозволяє інтегрувати інформацію з різних часових

точок [7]. Автори Y. Shu, C. Han, M. Lv та X. Liu розробили швидкий метод реконструкції за допомогою одиночної хвилі й стислої обробки, що може бути застосований у польовій діагностиці [14]. Розвиток цього напрямку потребує подальшого вивчення задля компромісу між швидкістю, обчислювальним навантаженням і точністю відновлення, особливо в контексті мобільних УЗ-пристроїв та екстреної медицини.

Аналіз літератури засвідчує, що методи суперрезолюції є важливою складовою майбутнього розвитку ультразвукової візуалізації.

Незважаючи на активний розвиток методів суперрезолюції, залишається низка аспектів, які потребують подальшого вивчення. Зокрема, недостатньо досліджено, як фізичні властивості ультразвукового сигналу впливають на втрату просторової деталізації в реальних клінічних умовах, що ускладнює адаптацію алгоритмів до специфіки конкретних анатомічних структур. Крім того, більшість досліджень орієнтуються на технічні метрики якості зображення, не враховуючи клінічну інтерпретованість, що є вирішальним критерієм у практичній діагностиці.

Невирішеними залишаються також питання недостатньої кількості маркованих УЗ-даних для навчання моделей, складності інтеграції з DICOM/PACS-системами та відсутності прозорих протоколів клінічної валідації. Запропоноване дослідження сприяє заповненню цих недоліків шляхом використання реальних зображень, оцінки результатів як за метриками SSIM і PSNR, так і за оцінкою лікарів, а також формулюванням практичних рекомендацій щодо безпечного впровадження суперрезолюційних моделей до медичної практики.

Мета і завдання статті. Метою статті є обґрунтування доцільності впровадження методів суперрезолюції для покращення деталізації ультразвукових зображень у медичній діагностиці шляхом аналізу їх технічної ефективності, класифікації, механізмів підвищення результативності та бар'єрів практичної реалізації.

Завдання статті:

1. Дослідити особливості формування ультразвукових зображень і фактори втрати деталізації, а також класифікувати сучасні методи суперрезолюції з аналізом їхніх технічних характеристик у медичній візуалізації.
2. Проаналізувати ключові підходи до підвищення ефективності методів суперрезолюції в ультразвуковій візуалізації, включаючи оптимізацію архітектури моделей, способи подання вхідних даних, методи попереднього навчання, а також механізми контролю достовірності реконструйованих зображень.
3. Виявити проблеми впровадження алгоритмів суперрезолюції до медичної практики та сформулювати рекомендації щодо їх безпечної інтеграції до діагностичних систем.

Виклад основного матеріалу. Формування ультразвукових зображень ґрунтується на принципах відбиття високочастотних звукових хвиль від тканин людського тіла. Ультразвуковий датчик випромінює акустичні імпульси, які відбиваються від меж середовищ з різною акустичною імпедансністю, а потім реєструються тим же датчиком. На основі часу проходження хвилі та амплітуди відбитого сигналу формується зображення. Однак цей процес є фізично обмеженим як з боку власне технології, так і з боку властивостей біологічних тканин, що призводить до втрати просторової деталізації. Основні обмеження пов'язані з дифракційною природою хвиль, абераціями сигналу, шумами, артефактами від розсіювання, а також параметрами системи сканування. Це створює суттєві бар'єри для візуалізації дрібних анатомічних структур, що особливо критично при діагностиці пухлин, судинних уражень або змін у м'яких тканинах. У цьому контексті важливо виявити ключові фактори, що впливають на якість отриманих зображень, і розмежувати їх за джерелом та механізмом дії (табл. 1).

У практичних умовах найсуттєвішими є дифракційні обмеження, які визначають межу мінімального розрізнення об'єктів залежно від довжини ультразвукової хвилі, та ефекти поглинання й розсіювання, особливо виражені при дослідженні глибоких або щільних анатомічних структур, як-от печінка, підшлункова залоза чи лімфатичні вузли. Варіації акустичних властивостей тканин, зокрема швидкості звуку, спричиняють аберації, які змінюють точку формування зображення й призводять до викривлення анатомії. Крім того, внутрішні та зовнішні артефакти часто імітують патологічні структури, ускладнюючи клінічну інтерпретацію. Просторове усереднення, характерне для традиційних методів сканування, призводить до втрати текстурних деталей, які мають вирішальне значення для диференційованої діагностики, зокрема при оцінці ехогенності новоутворень. У поєднанні ці фактори суттєво знижують якість зображень, зменшуючи їх діагностичну цінність. Саме тому в практиці сучасної ультразвукової діагностики все більш актуальним стає впровадження алгоритмів постобробки, зокрема методів суперрезолюції, які дозволяють реконструювати втрачені високочастотні компоненти та підвищити точність і надійність візуалізації без зміни апаратного забезпечення.

Таблиця 1

Основні фактори втрати просторової деталізації в ультразвукових зображеннях та механізми їх впливу

Фактор втрати деталізації	Джерело виникнення	Механізм впливу на зображення
Дифракційна межа роздільності	Фізичні властивості хвиль	Обмеження мінімального розміру об'єктів для візуалізації через довжину хвилі
Розсіювання та поглинання	Гетерогенність тканин	Зниження енергії сигналу, поява шумів, розмиття контурів
Акустичні аберації	Варіації щільності та швидкості звуку в тканинах	Викривлення траєкторії променя, зсув зображення
Артефакти	Внутрішнє відбиття, багаторазове віддзеркалення	Хибні елементи в зображенні, псевдоструктури
Просторове усереднення	Технологічні параметри сканування	Згладжування деталей, втрата текстурної інформації

Джерело: сформовано автором на підставі (Chen, Song, Yu та Kim, 2021; Ghosh та Hoyt, 2025; Temiz та Bilge, 2020; Hosseinpour, Behnam та Shojaeifard, 2019)

Сучасні методи суперрезолюції зображень, особливо в галузі медичної візуалізації, спрямовані на підвищення просторової роздільної здатності шляхом відновлення високочастотної інформації з низькоякісних вхідних зображень.

В умовах ультразвукової діагностики, де якість зображень суттєво обмежена фізичними чинниками (дифракція, шум та внутрішні артефакти), використання алгоритмів суперрезолюції відкриває нові можливості для покращення візуального представлення дрібних анатомічних структур. Класифікація методів суперрезолюції охоплює як класичні інтерполяційні та рекурсивні підходи, так і сучасні нейронні мережі, зокрема згорткові нейронні архітектури, генеративні моделі та трансформероподібні структури. Кожен з методів має свої особливості, пов'язані зі складністю реалізації, чутливістю до шуму, вимогами до обчислювальних ресурсів і точністю реконструкції анатомічно значимих елементів. У медичному контексті важливою є не лише кількісна оцінка якості (наприклад, за метриками SSIM чи PSNR), а й клінічна достовірність результатів, що визначає релевантність застосування конкретного алгоритму у реальній практиці (табл. 2).

Таблиця 2

Класифікація методів суперрезолюції в медичній візуалізації

Клас методів суперрезолюції	Технічні характеристики	Переваги	Обмеження
Інтерполяційні методи (Bicubic, Lanczos)	Лінійні математичні моделі без навчання; низька складність	Швидка обробка, низьке навантаження на систему	Втрата текстур, поява артефактів, відсутність адаптивності
Рекурсивні (Reconstruction-based)	Використання кількох зображень або фаз сигналу	Вища точність, можливість об'єднання інформації	Необхідність множинних кадрів, чутливість до шуму
Згорткові нейронні мережі (SRCNN, VDSR)	Навчені моделі, що реконструюють зображення через CNN	Висока точність, адаптивність до даних	Потреба в обчислювальних ресурсах, складність тренування
Генеративні моделі (SRGAN, ESRGAN)	Використання GAN для створення фотореалістичних деталей	Покращення візуального сприйняття, збереження текстур	Можливе створення нереальних структур, неконтрольованість
Трансформерні моделі (SwinIR тощо)	Багаторівнева обробка з урахуванням глобального контексту	Точна локалізація деталей, масштабованість	Висока складність, потреба у великих датасетах

Джерело: сформовано автором на підставі (Sawant та Kulkarni, 2022; Liu, Liu, Hou та ін., 2023; Van Sloun, Solomon, Bruce та ін., 2021; Liang, Cao, Sun та ін., 2021; Cammarasana, Nicolardi та Patanè, 2023)

Наведена класифікація демонструє широкий спектр підходів до завдання підвищення роздільної здатності ультразвукових зображень. На практиці в клінічних умовах найчастіше застосовуються згорткові нейронні мережі завдяки їх збалансованості між точністю та обчислювальною ефективністю, зокрема SRCNN [4]. Вони забезпечують суттєве покращення деталізації без створення артефактів, що важливо при візуалізації тканин із гомогенною структурою (наприклад, паренхіма печінки чи нирок).

Генеративні моделі, хоча й показують високу візуальну якість, потребують суворої валідації результатів, оскільки можуть формувати структури, невідповідні реальному анатомічному змісту [17]. Трансформерні архітектури, як-от SwinIR [8], набувають популярності в дослідженнях, але ще не мають широкого впровадження до клінічної практики через потребу у великих маркованих наборах даних та складність інтеграції до медичного програмного забезпечення [1].

Таким чином, вибір методу суперрезолюції залежить від контексту завдання, доступних ресурсів та вимог до клінічної точності, що визначає доцільність його використання в системах ультразвукової діагностики.

У сучасній медичній візуалізації спостерігається щораз більший інтерес до підвищення ефективності методів суперрезолюції шляхом удосконалення як власне архітектури моделей, так і способів подання даних, їх попередньої обробки та післяобробки. Ефективність моделей визначається не лише обраним типом нейронної мережі чи трансформерної структури, а й комплексом факторів, які забезпечують адаптацію до конкретних клінічних задач.

Важливу роль відіграє спосіб подання вхідного сигналу: використання кількох фазових або кутових кадрів, попереднє шумозаглушення чи нормалізація даних покращують стабільність реконструкції. Також суттєвий вплив має наявність попереднього навчання на великих наборах медичних зображень – за його відсутності моделі можуть втрачати здатність узагальнювати. Крім того, контроль якості реконструкції із застосуванням об'єктивних метрик або залученням лікарів до валідації результатів стає ключовим механізмом забезпечення достовірності опрацьованих зображень. На основі аналізу публікацій визначено декілька груп факторів, що впливають на результативність застосування суперрезолюційних алгоритмів у клінічному контексті (табл. 3).

Таблиця 3

Основні підходи до підвищення ефективності методів суперрезолюції в медичній візуалізації

Напрямок покращення	Зміст підходу	Очікуваний ефект
Оптимізація архітектури моделей	Удосконалення структури згорткових або трансформерних моделей для глибшого вилучення ознак	Зростання точності реконструкції та зниження втрати деталей
Підготовка вхідних даних	Нормалізація, фільтрація шуму, багатоканальне введення зображень	Зменшення спотворень і стабілізація вихідних результатів
Попереднє навчання на спеціалізованих наборах	Використання датасетів медичних зображень для тренування моделей	Підвищення адаптивності до клінічних структур
Постобробка результатів	Застосування фільтрів або вивірених алгоритмів для зменшення артефактів	Покращення візуального сприйняття без втрати анатомічної достовірності
Залучення експертної оцінки	Перевірка результатів клініцистами, порівняння з еталонами	Підвищення надійності у практичному застосуванні

Джерело: узагальнено автором на підставі (Temiz та Bilge, 2020; Cammarasana, Nicolardi та Patanè, 2023; Van Sloun, Solomon, Bruce та ін., 2021; Liu, Liu, Chen та Shan, 2022)

Описані підходи відображають ключові вектори оптимізації застосування суперрезолюційних алгоритмів у медичній візуалізації, які забезпечують не лише формальне покращення зображення, а й функціональну придатність результатів для клінічної інтерпретації.

Оптимізація архітектури моделей, зокрема шляхом використання глибших згорткових блоків або механізмів уваги в трансформерах, дозволяє досягти точнішого вилучення просторових і контекстуальних ознак, що особливо важливо для візуалізації дрібних судин, дифузних змін паренхіми чи локалізації патологічних утворень. Водночас якісна підготовка вхідних даних, зокрема зменшення шумів і покращення контрасту, мінімізує спотворення на ранньому етапі обробки, що позитивно позначається на кінцевому результаті навіть при використанні менш складних моделей.

Застосування моделей, попередньо навчених на репрезентативних клінічних датасетах, сприяє кращій генералізації до реальних анатомічних варіацій і зменшує ризик виникнення нефізіологічних артефактів. Особливу увагу слід приділяти етапу постобробки, де за допомогою спеціалізованих фільтрів або додаткових регуляризаційних методів здійснюється усунення надлишкових структур, нехарактерних для біологічних тканин.

Важливим елементом забезпечення клінічної достовірності є залучення лікарів ультразвукової діагностики до процесу валідації зображень, що дозволяє не лише оцінити зображення за суб'єктивною шкалою інтерпретованості, а й зафіксувати специфічні недоліки чи помилкові реконструкції. На практиці найефективнішими виявляються саме ті підходи, які враховують поєднання технічної оптимізації

з клінічним зворотним зв'язком, що забезпечує надійне впровадження алгоритмів суперрезолюції до діагностичного процесу без шкоди для точності та безпеки пацієнта.

Успішне впровадження методів суперрезолюції до медичної ультразвукової візуалізації супроводжується низкою практичних та організаційних проблем, які виходять за межі суто алгоритмічного забезпечення.

Одним з основних бар'єрів є обмежений доступ до високоякісних та клінічно маркованих ультразвукових зображень, необхідних для тренування та валідації моделей глибокого навчання [18], [6]. Більшість відкритих датасетів містить КТ або МРТ-знімки, тоді як дані ультразвукової візуалізації мають нижчу поширеність і значно більшу варіативність, що знижує можливість ефективного навчання моделей, орієнтованих на специфічні анатомічні області або патології [17].

Крім того, виникають труднощі із стандартизацією таких даних, зважаючи на залежність якості зображення від типу апарата, налаштувань, положення пацієнта та кваліфікації оператора [16].

Іншою суттєвою проблемою є складність інтеграції алгоритмів суперрезолюції до сучасних медичних інформаційних систем. Більшість лікарень використовують сертифіковане програмне забезпечення, що має суворі вимоги до безпеки, відстеження та відповідності нормативним актам у сфері охорони здоров'я [5]. Впровадження нових алгоритмів, особливо побудованих на основі штучного інтелекту, потребує додаткової сертифікації, технічної адаптації та перевірки на сумісність із DICOM-стандартами [12]. Це значно ускладнює практичну реалізацію, особливо в умовах державних медичних закладів із застарілим обладнанням та обмеженими фінансовими ресурсами.

Окрему категорію становлять юридичні та етичні аспекти, пов'язані з використанням автоматизованих методів реконструкції зображень, які потенційно можуть створювати артефакти або «домальовувати» структури, відсутні у первинному сигналі [15], [11]. У разі постановки хибного діагнозу постає питання про відповідальність: чи її покладено на лікаря, який користується вдосконаленим зображенням, чи на розробників програмного забезпечення. Також виникає потреба у прозорому поясненні дії алгоритму, що досі залишається складним завданням у разі застосування глибоких нейронних мереж, які функціонують як «чорна скринька».

Ефективна інтеграція алгоритмів суперрезолюції до системи медичної ультразвукової візуалізації вимагає врахування як технічних, так і клінічних вимог, пов'язаних із точністю реконструкції, безпекою використання та сумісністю з наявною інфраструктурою.

Зважаючи на різноманітність ультразвукових апаратів та діагностичних платформ, першочерговою умовою є адаптація алгоритмів до DICOM-формату та забезпечення їхньої сумісності з системами PACS (Picture Archiving and Communication System) [12]. Це дозволяє уникнути порушень у зберіганні, передачі та подальшій обробці медичних зображень, а також забезпечує можливість інтеграції без необхідності втручання до роботи апаратної частини УЗ-сканерів.

Одним із ключових аспектів є обов'язкове впровадження модулів клінічної валідації, які дозволяють лікарям порівнювати покращене зображення з оригіналом, оцінювати джерело змін та контролювати рівень автоматизованого впливу. Це сприяє підвищенню прозорості алгоритмічного втручання та зменшує ризики хибної інтерпретації. Рекомендовано також використовувати лише ті моделі суперрезолюції, які пройшли клінічні дослідження та демонструють стабільність у роботі з ультразвуковими даними, зокрема в умовах високого рівня шуму або варіативності структури тканин.

Особливу увагу слід приділити розробці інтерфейсів користувача, які забезпечують візуальний контроль над процесом реконструкції та дозволяють легко інтегрувати нові алгоритми через модульні надбудови без переривання клінічного робочого процесу. У разі їхнього впровадження до державних медичних установ рекомендується орієнтуватися на хмарні або гібридні обчислювальні рішення, що не потребують оновлення апаратної частини і дозволяють централізовано контролювати якість обробки зображень. Безпека даних при цьому має гарантуватися шляхом шифрування медичних зображень на всіх етапах обробки та зберігання.

Окремо варто передбачити наявність системи логування змін, що унеможливорює непомітне втручання до первинного зображення та забезпечує відстеження усіх дій у разі клінічної чи юридичної потреби.

Таким чином, інтеграція алгоритмів суперрезолюції має здійснюватися поетапно, з урахуванням клінічного контексту, ресурсних можливостей та нормативних вимог, із постійним контролем за точністю, стабільністю та відтворюваністю результатів.

Висновки. У результаті дослідження систематизовано сучасні методи суперрезолюції, що застосовуються для підвищення просторової деталізації ультразвукових зображень, та проаналізовано фактори, які визначають їх ефективність у клінічному застосуванні. У роботі встановлено, що найбільший потенціал мають глибокі нейромережеві архітектури, зокрема SRCNN і SwinIR, здатні забезпечити

високі значення PSNR і SSIM, а також зберегти клінічну достовірність реконструйованих структур за умови належної адаптації моделі до медичного контексту. Виявлено, що ефективність суперрезолюційних методів залежить не лише від архітектури моделі, а й від якості вхідних даних, застосування попереднього навчання, механізмів постобробки та участі клініцистів у валідації результатів. Автоматизація узагальнено ключові бар'єри впровадження таких алгоритмів до медичної практики, включаючи обмеженість маркованих УЗ-датасетів, труднощі з інтеграцією до DICOM-середовища, вимоги до сертифікації та юридичну відповідальність за результат автоматизованої реконструкції. У результаті запропоновано поетапну стратегію інтеграції алгоритмів суперрезолюції через використання відкритих моделей, створення модульних надбудов до діагностичних ПЗ, забезпечення контролю з боку лікаря та дотримання регуляторних вимог у сфері охорони здоров'я. Перспективними напрямками подальших досліджень є розробка адаптивних архітектур для конкретних анатомічних зон, стандартизація клінічної валідації результатів, а також формування національних медичних датасетів для тренування та тестування алгоритмів високої роздільності.

Список використаних джерел:

1. Cammarasana S., Nicolardi P., Patanè G. Super-resolution of 2D ultrasound images and videos. *Medical & Biological Engineering & Computing*. 2023. Vol. 61, № 11. P. 2511–2526. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11517-023-02818-x> (date of access: 25.03.2025).
2. Chen Q. et al. Current Development and Applications of Super-Resolution Ultrasound Imaging. *Sensors*. 2021. Vol. 21, no. 7. P. 2417. URL: <https://doi.org/10.3390/s21072417> (date of access: 25.03.2025).
3. Choi W., Kim M., HakLee J., Kim J., BeomRa J. Deep CNN-Based Ultrasound Super-Resolution for High-Speed High-Resolution B-Mode Imaging. 2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). 2018. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2018.8580032> (date of access: 25.03.2025).
4. Coinmonks on Medium: website. 2020. URL: <https://medium.com/coinmonks/review-srcnn-super-resolution-3cb3a4f67a7c> (date of access: 25.03.2025).
5. Couture O. et al. Ultrasound Localization Microscopy and Super-Resolution: A State of the Art. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2018. Vol. 65, no. 8. P. 1304–1320. URL: <https://doi.org/10.1109/tuffc.2018.2850811> (date of access: 25.03.2025).
6. Ghosh D., Hoyt K. Advancements in Three-Dimensional Super-Resolution Ultrasound Imaging. *Journal of Ultrasound in Medicine*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1002/jum.16682> (date of access: 25.03.2025).
7. Hosseinpour M., Behnam H., Shojaeifard M. Temporal super resolution of ultrasound images using compressive sensing. *Biomedical Signal Processing and Control*. 2019. Vol. 52. P. 53–68. URL: <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2019.03.003> (date of access: 25.03.2025).
8. Liang J., Cao J., Sun G., Zhang K., Van Gool L., Timofte R. SwinIR: Image restoration using Swin Transformer. Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. 2021. P. 1833–1844. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.10257> (date of access: 25.03.2025).
9. Liu H. et al. Progressive Residual Learning with Memory Upgrade for Ultrasound Image Blind Super-resolution. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*. 2022. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/jbhi.2022.3142076> (date of access: 25.03.2025).
10. Liu H., Liu J., Hou S., Tao T., Han J. Perception consistency ultrasound image super-resolution via self-supervised CycleGAN. *Neural Computing and Applications*. 2023. Vol. 35, № 5. P. 12331–12341. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05687-9> (date of access: 25.03.2025).
11. Liu T., Han S., Xie L., Xing W., Liu C., Li B., Ta D. Super-resolution reconstruction of ultrasound image using a modified diffusion model. *Physics in Medicine & Biology*. 2024. Vol. 69, № 12. Article ID 125026. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6560/ad4086> (date of access: 25.03.2025).
12. Radiological Society of North America (RSNA): website. 2024. URL: <https://www.rsna.org/annual-meeting> (date of access: 25.03.2025).
13. Sawant A., Kulkarni S. Ultrasound image enhancement using super resolution. *Biomedical Engineering Advances*. 2022. Vol. 3, № 1. Article ID 100039. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bea.2022.100039> (date of access: 25.03.2025).
14. Shu Y., Han C., Lv M., Liu X. Fast Super-Resolution Ultrasound Imaging With Compressed Sensing Reconstruction Method and Single Plane Wave Transmission. *IEEE Access*. 2018. Vol. 6, № 1. P. 39298–39306. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2853194> (date of access: 25.03.2025).
15. Song H., Yang Y. Super-resolution visualization of subwavelength defects via deep learning-enhanced ultrasonic beamforming: A proof-of-principle study. *NDT & E International*. 2020. Vol. 116. P. 102344. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102344> (date of access: 25.03.2025).
16. Temiz H., Bilge H. S. Super Resolution of B-Mode Ultrasound Images With Deep Learning. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8, № 1. P. 78808–78820. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2990344> (date of access: 25.03.2025).
17. van Sloun R. J. et al. Super-resolution Ultrasound Localization Microscopy through Deep Learning. *IEEE Transactions on Medical Imaging*. 2020. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/tmi.2020.3037790> (date of access: 25.03.2025).
18. Zhang Y., Lu S., Peng C., Zhou S., Campo I., Bertolotto M., Li Q., Wang Z., Xu D., Wang Y., Xu J., Wu Q., Hu X., Zheng W., Zhou J. Deep learning-based super-resolution US radiomics to differentiate testicular seminoma. *Oncology*. 2023. Vol. 13, № 1. Article ID 1090823.

УДК 681.518:004

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.3>**Надія БОЛЮБАШ**

кандидат педагогічних наук, доцент,

доцент кафедри інтелектуальних інформаційних систем,

Чорноморський національний університет імені Петра Могили, Nadiya.Bolubash@chmnu.edu.ua

ORCID: 0000-0002-2274-2422

Олександра ФІНЬКОВАмагістрантка кафедри інтелектуальних інформаційних систем, Чорноморський національний університет імені Петра Могили, foruw.af@gmail.com

ORCID: 0009-0007-1941-4042

АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ СЕНСОРІВ ДЛЯ ПРОГНОЗНОГО ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЛІНІЙ ВАЖКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Анотація. У статті розглянуто напрями цифрової трансформації технічного обслуговування технологічних ліній важкої промисловості, спрямовані на передбачення потенційної несправності обладнання до його повної функціональної відмови. Обґрунтовано вибір методів виявлення проблемних даних, що надходять від сенсорів технологічної лінії, націлених на зменшення інтервалу часу між виникненням проблеми та її виявленням. Розглянуто підходи до забезпечення оптимального оновлення даних моделей Predictive Maintenance, які забезпечують кращу точність прогнозування відмов.

Метою статті є дослідження та виявлення ефективних методів аналізу якості даних показників сенсорів технологічних ліній у важкій промисловості для підвищення точності прогнозування поломок при проведенні прогнозного технічного обслуговування.

Методологія. Проаналізовано програмно-апаратні рішення, спрямовані на підвищення точності прогнозу несправностей технологічних ліній, що базуються на RCM-методології. Використано методи кореляційного аналізу даних, описової та контекстної статистики для моніторингу даних показників сенсорів. Запропоновано послідовність етапів виявлення проблемних даних в умовах реального виробництва на підприємствах важкої промисловості, які забезпечують автоматизовану генерацію їх потенційних джерел.

Наукова новизна дослідження полягає у виявленні в умовах Industry 4.0 методів і підходів до аналізу показників сенсорів технологічних ліній, спрямованих на підвищення точності моделей прогнозного технічного обслуговування.

Висновки. Супроводження прогнозних моделей Predictive Maintenance, які обслуговують технологічні лінії важкої промисловості, в умовах реального виробництва вимагає здійснення коригування та оновлення їх параметрів на основі постійного моніторингу стану обладнання у режимі реального часу. Для забезпечення виявлення проблемних даних обґрунтовано доцільність розробки інформаційної системи, яка реалізує аналіз даних показників сенсорів із застосуванням методів описової, контекстної статистики та кореляційного аналізу даних. Результати впровадження розробленої інформаційно-аналітичної системи, яка включає в себе рекомендаційну систему на етапі формування набору даних для аналізу, супроводжувалися підвищенням точності прогнозування несправностей і зменшенням часу між виникненням та виявленням проблем, які призводять до відмови обладнання. Що свідчить про вирішення експлуатаційних задач із більш високою точністю та ефективністю.

Ключові слова: технологічна лінія, прогнозне технічне обслуговування, прогнозне технічне обслуговування на основі стану, прогнозна модель, описова статистика, контекстна статистика, кореляційний аналіз.

Nadiia BOLIUBASH, Oleksandra FINCOVA. ANALYSIS OF SENSOR INDICATORS FOR PREDICTIVE MAINTENANCE OF HEAVY INDUSTRY PROCESS LINES

Abstract. The article considers the directions of digital transformation in the maintenance of process lines of heavy industry, aimed at predicting potential equipment malfunctions before their complete functional failure. The choice of methods for detecting problematic data coming from sensors of the process line is justified, aimed at reducing the time interval between the occurrence of a problem and its detection. Approaches to ensuring optimal updates of Predictive Maintenance models are considered, which enhance the accuracy of failure prediction.

The purpose of the article is to research and identify effective methods for analyzing the quality of data from sensors of process lines in heavy industry to increase the accuracy of failure prediction in predictive maintenance.

Methodology. Software and hardware solutions aimed at increasing the accuracy of forecasting faults in process lines based on the RCM methodology have been analyzed. Methods of correlation analysis, descriptive and contextual statistics were used to monitor sensor indicator data. A sequence of stages for detecting problematic data in real-world production conditions in heavy industry is proposed, which provide automated generation of potential sources of faults.

The scientific novelty of the research lies in the identification of methods and approaches to analyzing the performance of sensors of process lines in the conditions of Industry 4.0, aimed at increasing the accuracy of predictive maintenance models.

Conclusions. Maintaining Predictive Maintenance models that serve heavy industry process lines in real production conditions requires adjusting and updating their parameters based on constant monitoring of the equipment status in real time. To ensure the detection of problematic data, the feasibility of developing an information system, implementing the analysis of sensor indicators data using descriptive statistics, contextual statistics, and correlation analysis methods. The

results of implementing the developed information and analytical system, which includes a recommendation system at the stage of forming a data set for analysis, were accompanied by an increase in failure prediction accuracy and a decrease in the time between the occurrence and detection of problems leading to equipment failures. This indicates that operational tasks are being solved with higher accuracy and efficiency.

Key words: process line, predictive maintenance, condition-based predictive maintenance, predictive model, descriptive statistics, contextual statistics, correlation analysis.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій. В умовах високих темпів інформатизації сучасного суспільства здійснюється реалізація Industry 4.0 – четвертої промислової революції, яка передбачає перехід до автоматизованого цифрового виробництва під управлінням інтелектуальних систем у режимі реального часу [2, 13]. Поява технології промислового Інтернету речей (англ. Industrial Internet of Things, IIoT) суттєво оптимізувала управління промисловими операціями шляхом підключення промислових активів до інформаційних систем [10]. У рамках Industry 4.0 та IIoT широко розповсюдженням у різних сферах виробництва є застосування для обслуговування технологічних ліній прогресивних стратегій технічного обслуговування, які базуються на RCM-методології (англ. Reliability Centered Maintenance) [7]. Ця методологія спрямована на забезпечення надійності обладнання шляхом недопущення відхилення параметрів стану обладнання до критичних значень, які можуть призвести до поломки.

Технологічні лінії є сукупністю машин та апаратів, сполучених транспортними пристроями, які утворюють єдиний технологічний ланцюг виробничого процесу, специфічний для кожної індустрії та підприємства. Технічне обслуговування забезпечує надійну та ефективну роботу технологічних ліній, а для відслідковування роботи їх пристрої та обладнання забезпечені сенсорами. Традиційні підходи до технічного обслуговування включають реактивне, коригувальне та профілактичне обслуговування [8]. Реактивне обслуговування відбувається у разі повної поломки обладнання, коригувальне – коли проблема виявлена, але збою в роботі ще немає. Профілактичне обслуговування включає регулярні за встановленим графіком перевірки роботи обладнання.

У важкій промисловості застосування традиційних підходів є високо затратним за рахунок високої вартості обладнання технологічних ліній та значних фінансових втрат під час їх простою і перерв у виробництві. Тут доцільно застосовувати більш прогресивні підходи – прогнозне технічне обслуговування (англ. Predictive Maintenance, PdM), яке використовує дані показників сенсорів і дані про несправності, щоб заздалегідь передбачити майбутню потенційну непрацездатність обладнання [9, 19]. Такий підхід дозволяє на основі сукупних даних, що надходять від сенсорів технологічної лінії, яка є в експлуатації, здійснити прогнозування майбутньої деградації та відмови обладнання. Це надає можливість виконати технічне обслуговування до того, як станеться критичний збій [5, 16].

Прогнозне технічне обслуговування є актуальною темою наукових досліджень, що обумовлено зростанням кількості промислових об'єктів та даних, які отримуються від різноманітного обладнання технологічних ліній. Сучасні дослідження науковців у сфері Predictive Maintenance націлені на створення моделей прогнозування відмов і зосереджені навколо таких основних підходів [2]: на основі чіткого математичного опису фізичних моделей деградації обладнання [11], на основі методів, керованих даними, отриманими від моніторингу стану обладнання [4, 22], на основі гібридних методів, які поєднують елементи перших двох підходів [23].

На підприємствах важкої промисловості прогносні моделі (англ. Predictive Models) в рамках PdM частіше всього реалізують за допомогою методів, керованих даними та з використанням гібридних підходів [9]. Створення і розгортання таких моделей включає збір великих обсягів даних показників сенсорів, їх попередню обробку, проведення аналізу даних із метою виявлення аномалій та здійснення діагностики – чи свідчать виявлені аномалії про несправність, яка може призвести до відмови обладнання. Реалізація кожного з цих етапів життєвого циклу моделі прогнозування відмов базується на застосуванні різних методів і алгоритмів машинного навчання (англ. Machine Learning), інтелектуального аналізу даних (англ. Data Mining), штучного інтелекту (англ. Artificial Intelligence) та статистики [2]. Інтеграція таких моделей у робочі процеси підприємства важкої промисловості включає систему оповіщення працівників технічного обслуговування технологічних ліній у разі виявлення будь-яких аномалій обладнання у вигляді чітких протоколів реагування та попередження.

Однак моделі, які здійснюють прогнозування збоїв та поломки у роботі обладнання, в умовах реального виробництва стикаються з необхідністю постійного оновлення їх параметрів. Це обумовлено як зміною технічних характеристик пристроїв та обладнання технологічних ліній у процесі їх експлуатації, так і наявністю не врахованих при створенні моделі факторів, які є важливими для виявлення аномалій. Для вирішення цієї проблеми здійснюється прогнозне технічне обслуговування на основі стану (англ. Condition-based Predictive Maintenance, CBPdM), відоме також як Maintenance 4.0, яке підтримує рішення прогнозного технічного обслуговування залежно від процесу моніторингу стану технологічної

лінії [18]. CBPdM передбачає аналіз даних показників сенсорів, зібраних під час моніторингу, із метою виявлення проблемних даних, які можуть впливати на точність моделі при прогнозуванні можливих відмов у роботі технологічних ліній. Із урахуванням цієї аналітики відбувається оновлення прогнозних моделей та забезпечується уникнення збоїв у їх роботі.

Як зазначають практики, які займаються розробкою та впровадженням прогнозних моделей, регулярна перевірка та налаштування моделей із використанням нових даних для кращої точності прогнозів є одним із ключових етапів їх обслуговування [13]. Це передбачає співпрацю як фахівців Data Science, які створюють, впроваджують та супроводжують прогнозні моделі, так і практиків, які обслуговують певну технологічну лінію.

Ефективність моделей залежить від якості даних, а проблеми, пов'язані з їх точністю, повнотою та узгодженістю є суттєвим фактором, який впливає на вчасне виявлення потенційних несправностей обладнання та оптимізацію технічного обслуговування. Тому критично важливим для оновлення і коригування параметрів прогнозних моделей є виявлення проблем із даними та обґрунтування вибору методів для проведення їх якісної аналітики. Однак практична реалізація методів такого аналізу як невід'ємного компонента CBPdM не є достатньо вивченою і потребує подальшого опрацювання. Це обумовило **мету статті**, яка полягає у дослідженні та виявленні ефективних методів аналізу якості даних показників сенсорів технологічних ліній у важкій промисловості для підвищення точності прогнозування поломок при проведенні прогнозного технічного обслуговування.

Виклад основного матеріалу. Прогнозне технічне обслуговування використовує часові ряди історичних даних і даних про несправності, які надходять від сенсорів, щоб заздалегідь передбачити проблеми із працездатністю обладнання. Це дозволяє підприємствам оптимізувати планування технічного обслуговування та підвищити надійність технологічних ліній.

Впровадження прогнозних моделей на підприємствах важкої промисловості сьогодні ще не має стандартної еталонної архітектури. Вивчаючи основні компоненти технології PdM, вчені зосереджують увагу на виявленні аномалій, діагностиці та прогнозі майбутньої несправності. CBPdM стежить за процесами збору, вилучення та попередньої обробки даних, щоб підтримувати прийняття рішень за допомогою інформації про стан працездатності системи. Інформацію, отриману в результаті процесу виявлення проблем із якістю даних, можна використовувати на рівні PdM для кращого опису працездатності системи та більш точного прогнозу майбутньої поломки [18].

Для кожної технологічної лінії прогнозна модель зосереджена на якнайшвидшому виявленні сигнатур майбутньої несправності, зафіксованих даними сенсорів, за рахунок зменшення інтервалу часу між виникненням проблеми та її виявленням, коли повної відмови обладнання ще не відбулося [9, 16]. Поширеним способом відображення поведінки обладнання до того, як сталася фактична функціональна несправність, яка приводить до зупинки технологічної лінії, є P-F крива (рис. 1), де S є час виникнення проблеми, P – час її виявлення, а F – час повної відмови обладнання. Застосування Condition-based Predictive Maintenance націлене на максимізацію інтервалу P-F на цій кривій та, відповідно, мінімізацію інтервалу S-P [5].

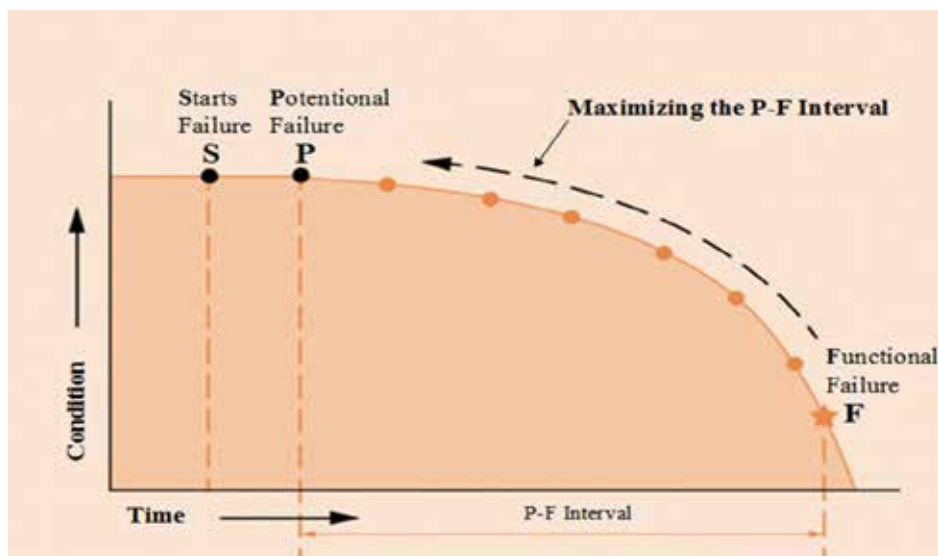


Рис. 1. P-F крива поведінки обладнання від початку поломки до повної функціональної відмови

Вчені, які досліджують PdM і CBPdM, зазначають, що використання аналітики даних покращує продуктивність і точність моделей прогнозного технічного обслуговування, а також підвищує їх автономність та адаптивність у складних динамічних робочих середовищах [20]. Для обґрунтування вибору методів проведення аналізу якості даних для коригування та оновлення параметрів моделей було здійснено дослідження наявних проблем із даними показників сенсорів технологічних ліній.

Для складних технологічних ліній існує широкий діапазон типів поломок, виявлення яких у комплексі суттєво підвищує якість прогнозової моделі [6]. Аналіз сучасних досліджень науковців та практиків у сфері прогнозного обслуговування технологічних ліній дозволив виявити можливі джерела проблем із якістю даних. В умовах реального виробництва та експоненційного росту обсягів даних похибки можуть бути обумовлені:

- недосконалою конфігурацією сенсорів технологічної лінії – наявністю сенсорів, дані з яких не несуть інформацію, яка може бути використана для прогнозування несправностей та відсутністю у певних компонентів сенсорів, необхідних для прогнозування відмов [21]: виявлення цієї проблеми вимагає встановлення сенсорів, яких не вистачає та виключення з аналізу даних від сенсорів, які не є суттєвими для виявлення несправностей;
- неналежним калібруванням сенсорів, що спотворює дані, які надходять від них [20]: використання сенсорів потребує їх калібрування при встановленні та періодично у процесі експлуатації на основі досконало розроблених протоколів, які забезпечують точність вимірів та відповідність стандартам;
- наявністю надмірних даних, що обумовлено великою кількістю сенсорів або частою фіксацією значень показників, які надходять від окремих сенсорів [17]: це вимагає застосування методів зменшення розмірності даних або методів агрегації даних на етапі їх попередньої обробки;
- недостатньою інтеграцією IoT-систем та перебоями у їх підключенні, що спричиняє наявність фрагментарних, неповних потоків даних, відсутність синхронізації даних у режимі реального часу [3, 14], неузгодженість даних сенсорів [10, 15]: виявлення таких проблем потребує інтеграції розподілених систем для збору високоточних даних та управління ними, забезпечення синхронізації при проведенні аналізу режимів роботи, для яких характерні відмови у роботі обладнання;
- високою варіативністю даних [17], зовнішніми впливами, які спричиняють шум в даних [14, 15, 17]: виявлення цих проблем вимагає застосування методів, які враховують операційні відмінності між промисловими установками та методів зменшення й усунення шуму на етапі попередньої обробки даних;
- недостатньою деталізацією даних для точних прогнозів [15], низькою роздільною здатністю (англ. resolution) сенсорів, наявністю пропусків у даних [20]: це потребує здійснення коригувань у налаштуваннях чутливості сенсорів та застосування методів для заповнення пропущених даних;
- дублюванням даних, неналежним чином врахованою залежністю даних, які надходять від обладнання: для виявлення цих проблем необхідним є проведення кореляційного аналізу даних показників сенсорів;
- дисбалансом у даних, обумовленим домінуванням часу нормальної роботи та наявністю рідкісних несправностей, що ускладнює прогнозування відмов: усунення такого роду проблем потребує при зборі даних адекватно враховувати проміжки часу, які містять несправності.

Проблеми, які впливають на точність моделей прогнозування відмов, охоплюють різноманітні аспекти якості та кількості даних на кожному з етапів функціонування технологічної лінії. Запропоновані для покращення точності прогнозів і ефективності систем PdM дослідниками апаратно-програмні рішення потребують здійснення аналізу великих обсягів даних, які надходять від усіх сенсорів технологічної лінії.

Проведений аналіз останніх досліджень та публікацій дозволив обґрунтувати вибір статистичних методів, які доцільно застосувати для виявлення проблем із якістю даних. Для здійснення моніторингу показників сенсорів було створено інформаційну систему, адаптовану для виявлення проблемних даних на різних технологічних лініях важкої промисловості [1], яка реалізує аналітику даних у реальному часі та історичних даних сенсорів із застосуванням описової статистики, контекстної статистики та кореляційного аналізу даних. Послідовність етапів аналізу показників сенсорів для прогнозного обслуговування технологічних ліній із використанням розробленої інформаційно-аналітичної системи продемонстровано на рисунку 2.

Розробку web-застосунку системи здійснено з використанням мови програмування Python та фреймворку Flask. Для створення інтерактивних інформаційних панелей було застосовано аналітичний фреймворк Plotly Dash, який на основі використання у зв'язці Flask, React.js, Plotly.js, HTML та CSS дозволив реалізувати візуалізацію моніторингу даних зі зворотними викликами (англ. callbacks), що враховують оновлення даних. Такий підхід надав можливість зручно використовувати аналітичну потужність

Python-бібліотек Pandas, NumPy та Plotly для представлення результатів проведеного аналізу у вигляді гістограм, теплових карт коефіцієнтів кореляції, часових рядів показників сенсорів із позначенням пропусків і періодів завмерлих даних.

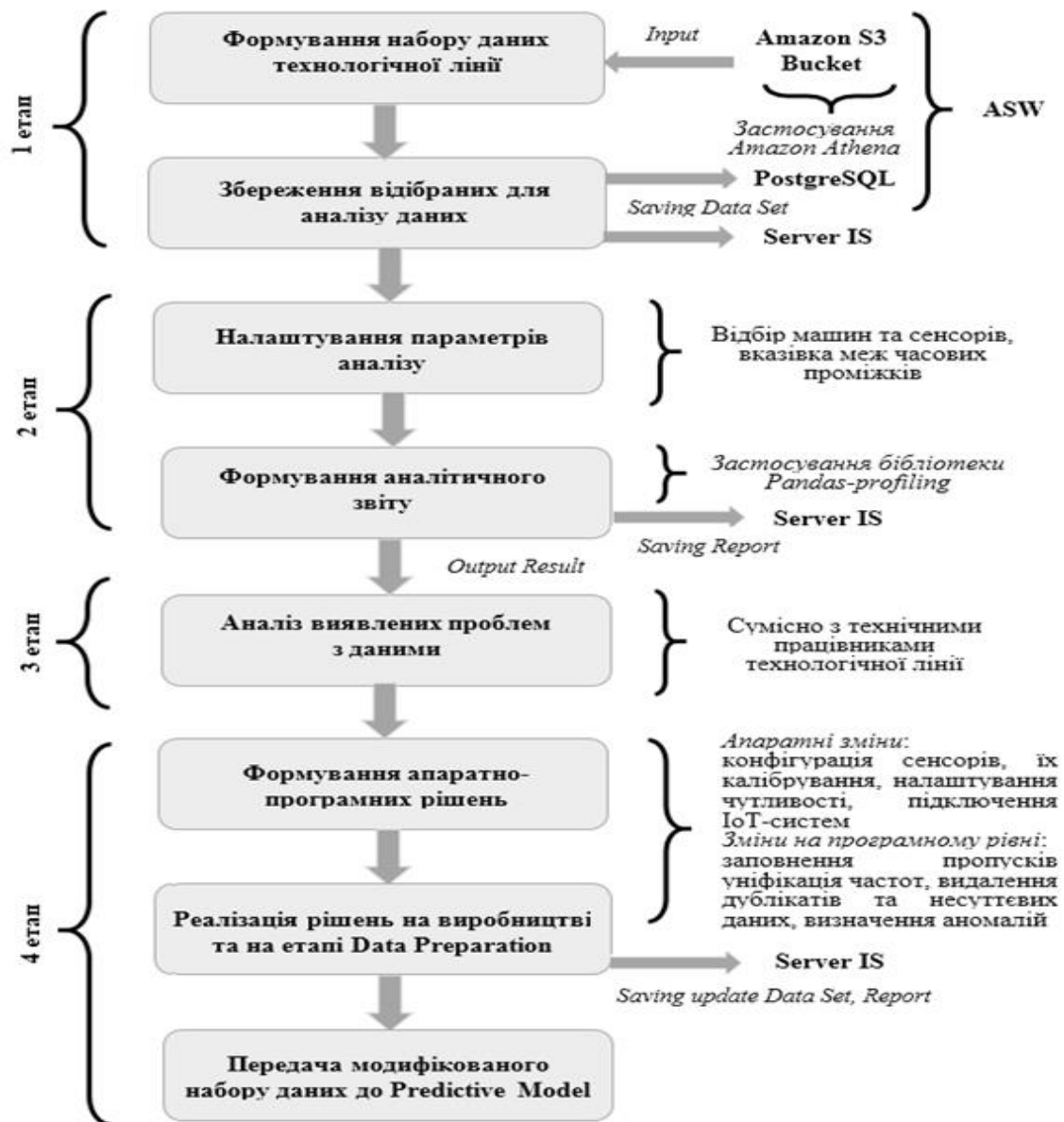


Рис. 2. Етапи аналізу показників сенсорів технологічної лінії у розробленій інформаційно-аналітичній системі

Автоматичне створення звітів із результатами проведеного статистичного аналізу було реалізовано за допомогою бібліотеки Pandas-profiling. Графічний інтерфейс web-застосунку створено з використанням бібліотеки Dash Bootstrap Components [12], яка полегшила реалізацію стилю зі складним, адаптивним макетом при відображенні аналітичних блоків, таблиць і фільтрів.

У системі аналізу показників сенсорів технологічних ліній для зберігання даних передбачено використання баз даних Amazon Web Services (AWS) та серверу інформаційної системи. Інформація у вигляді великих обсягів хронологічної послідовності показників сенсорів – часових рядів, зберігається у хмарному сховищі Amazon S3 Bucket. Метадані про сенсори зберігаються на Amazon S3 в форматі JSON і включають: першу та останню дати часового ряду показників сенсорів, список пропусків даних, статистичні характеристики часових проміжків у часовому ряді (мінімальний, максимальний, медіана).

Аналіз даних у сховищі Amazon S3 здійснюється стандартними засобами SQL із використанням інтерактивного сервісу запитів Amazon Athena, який підтримує розподілену обробку даних великих обсягів.

Обрані для аналізу дані та метадані, отримані з хмарного середовища AWS, після обробки зберігаються в СУБД PostgreSQL та на сервері розробленої інформаційно-аналітичної системи. Результати проведеного аналізу у вигляді розрахованих статистичних показників, необхідних для відображення у вигляді таблиць та графіків, зберігаються в форматах .pcl та .parq на сервері системи. Для спрощення роботи з реляційними базами даних було використано Python-бібліотеку SQLAlchemy, для паралельної обробки великих обсягів даних на внутрішніх серверах – Python-бібліотеку multiprocessing. Описаний підхід до зберігання та обробки даних дозволив мінімізувати навантаження на головні сервери і витрати на звернення до AWS. Обраний стек технологій забезпечує ефективну масштабовану обробку і зберігання великих обсягів даних, а також реалізацію статистичних методів і візуалізацію результатів аналізу.

У системі реалізовано розрахунок наступних показників для кожного сенсора: кількість і відсоток окремих варіантів значень, кількість і відсоток нульових та від'ємних значень. Для технологічних ліній з уніфікованим моніторингом розраховують кількість і відсоток наявних та пропущених значень.

Для вибірки значень показників кожного сенсора передбачено розрахунок та виведення стандартних показників описової статистики:

- загальна кількість значень N , мінімальне $X_{\min}$ та максимальне значення $X_{\max}$;
- медіана та середнє арифметичне значення $\bar{X}$;
- розмах значень $R = X_{\max} - X_{\min}$, проценти $P_5, P_{25}, P_{75}, P_{95}$;
- міжквартильний розмах:

$$IPQ = Q_3 - Q_1, \quad (1)$$

де $Q_3 = P_{75}, Q_1 = P_{25}$;

- середнє абсолютне відхилення (англ. Mean Absolute Deviation):

$$MAD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X_i - \bar{X}|, \quad (2)$$

де X_i – i -те значення показника сенсора;

- дисперсія σ^2 (англ. Variance) та середньоквадратичне відхилення (англ. Standard Deviation) σ , де:

$$\sigma^2 = \frac{(X_i - \bar{X})^2}{N-1}; \quad (3)$$

- гістограма розподілу та таблиця із кількістю 20 найуживаніших значень.

Реалізовано розрахунок коефіцієнтів:

- варіації (англ. Variation):

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{X}}; \quad (4)$$

- асиметрії (англ. Skewness):

$$As = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} \right)^3; \quad (5)$$

- ексцесу (англ. Kurtosis):

$$Ex = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} \right)^4 - 3. \quad (6)$$

У режимі реального часу збирається велика кількість контекстних даних, на основі яких здійснюється розрахунок для часового ряду показників кожного сенсора із виведенням у табличному та графічному вигляді:

- для часових проміжків: 1) кількості часових проміжків, 2) кількості варіантів тривалості часових інтервалів між сусідніми значеннями (для з'ясування уніфікованості), 3) статистичних показників тривалості інтервалів (мінімальне та максимальне значення, медіана та середньоарифметичне значення, проценти 25% і 75%);

- для пропусків даних: 1) найдовшої тривалості пропущених даних, 2) дати початку та завершення найдовшого пропуску даних; 3) кількості періодів пропусків, 4) загальної тривалості часу без даних в годинах та відсотках;

– для завершених даних: 1) найдовшої тривалості завершених даних, 2) дати початку та завершення найдовшого періоду завершених даних; 3) загальної тривалості часу завершених даних в годинах та відсотках.

Для проведення кореляційного аналізу у системі обрано розрахунок універсального коефіцієнта кореляції ϕk , який дозволяє фіксувати як лінійну так і нелінійну залежність між змінними та узгоджено працює з даними, які можуть бути представлені у різних шкалах. Цей коефіцієнт приймає значення в інтервалі від 0 до 1, його розрахунок по замовчуванню супроводжується застосуванням методів вилучення шуму. Високий коефіцієнт кореляції може бути обумовлений як залежністю значень одного сенсора під впливом зміни значень іншого сенсора, так і дублюванням даних.

Робота з web-застосунком інформаційної системи починається з вибору сценарію: користувач може обрати існуючий звіт або створити новий (рис. 3). Якщо хоча б один звіт існує, активною буде вкладка Select project із переліком існуючих звітів, кожен з яких можна обрати для перегляду та у разі потреби оновити. Для створення нового звіту необхідно відкрити вкладку Create project.

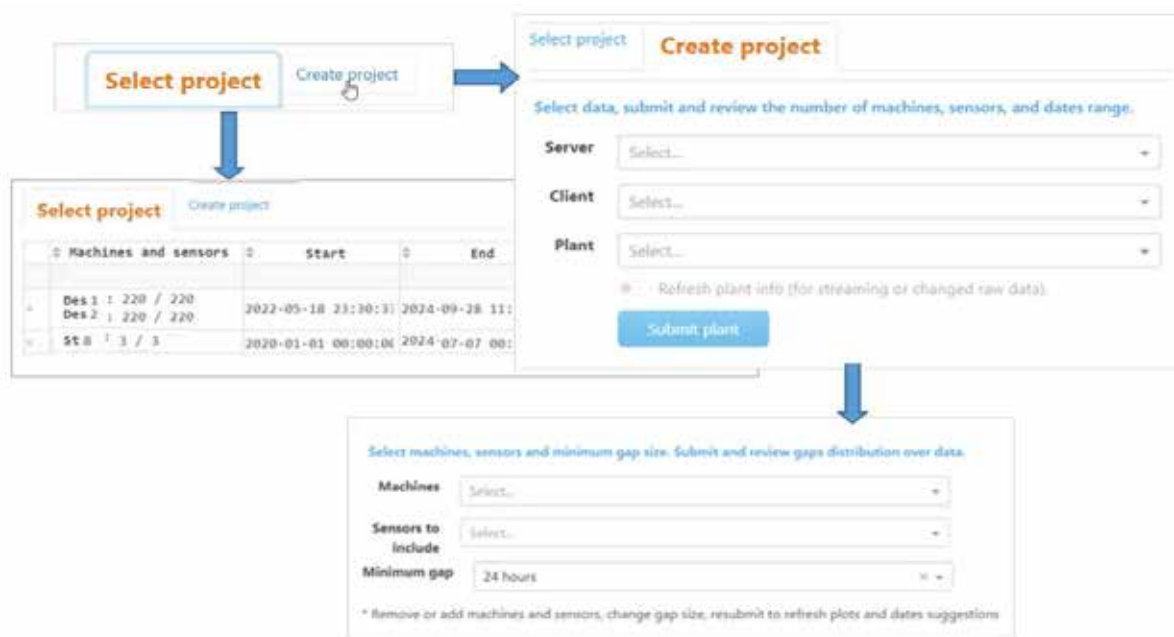


Рис. 3. Вибір сценарію роботи

На *першому етапі* проведення аналізу даних у розробленій системі здійснюється формування набору даних, яке включає у себе запит до хмарного середовища Amazon Web Services, у якому зберігається уся наявна інформація стосовно певної технологічної лінії, та відбір машин і сенсорів, дані з яких будуть аналізуватися із вказівкою часового проміжку, який буде вважатися пропуском. Отримані у відповідь на цей запит дані зберігаються на внутрішньому сервері системи і використовуються для подальшого аналізу, для якого необхідно вказати межі часового проміжку. При формуванні набору даних є можливість міняти параметри налаштувань: перелік обраних машин, сенсорів, межі часових проміжків та повторно проводити аналіз із модифікованим набором даних.

На *другому етапі* після налаштування параметрів аналізу показників сенсорів технологічної лінії із застосуванням бібліотеки Pandas-profiling здійснюється формування багатосторінкового статистичного аналітичного звіту, результати якого у web-застосунку системи можна переглядати на вкладках (рис. 4): Summary – підсумки, Sensors Basic Stats – основна статистика, Freeze Sensors Analysis – аналіз завершених даних, Correlation Analysis – кореляційний аналіз, Gaps and Time Interval Analysis – аналіз пропусків і часових інтервалів. Звіт зберігається на внутрішньому сервері системи та додається у перелік уже існуючих звітів.

На *третьому етапі* роботи з системою здійснюється перегляд та аналіз отриманих результатів фахівцем Data Science. Застосування інформаційно-аналітичної системи дозволяє автоматизувати процеси виявлення проблем із даними, надаючи рекомендації їх можливих потенційних джерел. Аналітик, який працює з системою, у разі потреби сумісно з технічними працівниками, які обслуговують технологічну лінію на підприємстві, з'ясовує реальні причини проблемного надходження даних. Врахування

специфіки кожної проблеми слугує основою для подальшого прийняття адекватних рішень, націлених на покращення якості даних та підвищення точності прогнозування відмов.

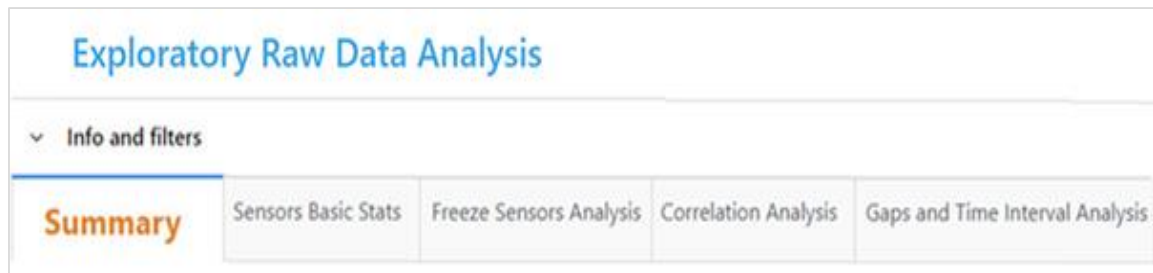


Рис. 4. Вкладки сторінки з результатами проведеного аналізу

Автоматично визначений перелік сенсорів, які можуть містити проблемні дані, можна переглянути на вкладці Summary web-застосунку (рис. 5).

До проблемних будуть відібрані сенсори, що мають:

- сталі значення на всьому часовому проміжку: виявлені константи вилучають із аналізу;
- менше 10 окремих значень: сенсор може бути індикативним (позначає перемикання механізмів, а не процес їх роботи) або фіксувати значення, представлені у категоріальній шкалі;

The table below includes sensors with some problematic statistical characteristics.
Problematic values are highlighted, hover on column header for more explanations.

Freeze Sensors Analysis Correlation Analysis Gaps and Time Interval Analysis

Automatically selected sensors ⓘ

Export

#Sensor	#Distinct value No	#Zero values %	#Missing values %	#Coefficient of variation	#Kurtosis	#Type	#Time interval distinct values No	#Longest gap (hrs)	#Longest freeze (hrs)	#Highly correlated sensors No	#Predefined conditions
filter data											
CRS_A	5	92.33	0	3.47	463.38	Numeric	1	76.92	1670.5	0	0
CRS_DS	723	54.84	0	43.5	18.37	Numeric	1	76.92	143.28	2	0
CRS_CT	1736	92.59	0	21.51	25.25	Numeric	1	1224.29	1224.29	0	0

Рис. 5. Таблиця сенсорів, які мають проблемні дані

- більше 10% нульових та пропущених значень: сенсори, які фіксують показники працюючого устаткування, майже ніколи не можуть бути нульовими;
- високі значення коефіцієнту варіації: свідчать про неоднорідність значень показників сенсора;
- високі значення коефіцієнту ексцесу: є мірою інтенсивності викидів;
- не числовий тип даних: перед передачею даних до моделі повинен бути перетворений до числової шкали;
- велику різницю між мінімальним, медіанним та максимальним значеннями тривалості інтервалів: це може свідчити про наявність неякісних даних;
- довгі тривалості часових проміжків: потребують з'ясування причин нерівномірного надходження даних;
- довгі тривалості періоду пропущених даних: потребують з'ясування причин і в залежності від цього можуть бути вилучені з аналізу або заповнені даними (наприклад, дані можуть надходити тільки тоді, коли змінюються);
- довгі тривалості періоду завмерлих даних: часто свідчать про наявність проблем на етапі накопичення та передачі даних (дані можуть бути уже агреговані або бути результатом апаратної помилки при передачі даних);
- високі коефіцієнти кореляції з групою більше ніж трьох сенсорів: потребують з'ясування причин залежності чи виявлення наявності дублювання даних.

Текстовий блок вкладки Summary включає переліки проблем з даними, на які варто звернути увагу (рис. 6).

Sensors with zero values: 98 sensors with more than 10% and less than 100% of zero values: Median percent of zero values for these sensors: 100.0. Sensors with missing values: Not found. Sensors with negative values: 20 sensors with negative values: Median percent of negative values for these sensors: 0.33. Sensors with high coefficient of variation: 30 sensors with CV > 1: Median CV value for these sensors: 1.85. Sensors with higher chances of outliers (based on kurtosis values): 27 sensors with kurtosis > 5: Median kurtosis value for these sensors: 207.42. Categorical sensors: Not found.	Time interval: 143 sensors with not constant time interval: There are up to 95 different interval values per sensors. Freezes: 167 sensors with freezes: Median number of freezes per sensor is 2. Median freeze duration per sensor is 142.2 hours. Gaps: 183 sensors with gaps: Median number of gaps per sensor is 3. Median gap duration per sensor is 75.76 hours. Correlation groups: 28 correlation group(s) found. Number of correlated sensors in each group varies from 1 to 15.
--	--

Рис. 6. Текстовий блок із переліком даних, які містять проблеми

У наведеному на рисунку 6 прикладі до таких віднесено дані, які містять від'ємні значення (це можуть бути помилкові дані). Високі коефіцієнти експесу свідчать про наявність викидів у 27 сенсорів – на їх фоні виявлення аномалій може бути ускладнене. Якщо викиди не синхронізовані з аномаліями інших сенсорів, необхідно перевірити якість передачі даних від цих сенсорів. Виявлено 28 груп сенсорів із високим коефіцієнтом кореляції та наявністю у кожній групі до 15 сенсорів. У такому випадку прогнозна модель може надавати перевагу у виявленні аномалій, пов'язаних із даними, які надходять від цих сенсорів та не помітити інші аномалії. У 167 сенсорів є завмерлі дані, які тривають по кілька днів – це потребує з'ясування причин та у разі необхідності внесення відповідних коректив. 183 сенсори мають пропуски – це можуть бути незмінні або втрачені значення. Із 220 сенсорів 143 мають неуніфіковані інтервали (від 0,5 секунд до годин). Це потребує внесення змін до даних, спрямованих на їх уніфікацію, на етапі попередньої обробки даних. При цьому використовують інформацію, яка міститься у таблиці з основними характеристиками усіх сенсорів вкладки Summary (рис. 7).

All machine Sensors													
Export													
	Sensor	Type	Gaps			Freezes			Intervals				
			Longest (hrs)	Total (hrs)	% of Duration	Longest (hrs)	Total (hrs)	% of Duration	Min	Mean	Median	Std	Max
	filter data.												
x	0_CA 3176	Constant	1224.29	3176.42	105.25	2190.47	2190.47	72.58					
x	0_H 63	Numeric	38.99	63.26	0.41				0.5	0.5	0.5	0	0.5
x	0_F4V	Constant	1224.29	3176.42	105.25	2190.47	2190.47	72.58					
x	0_N_V	Constant	1224.29	3176.42	105.25	2190.47	2190.47	72.58					
x	0_V 56	Numeric	39.08	63.35	0.41				0.5	0.5	0.5	0	0.5
x	0_V42	Numeric	39.08	63.36	1.79	1.03	1.03	0.03	0.5	0.5	0.5	0	0.5
x	0_V4N	Constant	1224.29	3176.42	105.25	2190.47	2190.47	72.58					
x	0_VBC	Numeric	39	63.27	1.79	1.02	1.02	0.03	0.5	0.5	0.5	0	0.5
x	0_VBN	Constant	1224.29	3176.42	105.25	2190.47	2190.47	72.58					
x	0_VCA 63	Numeric	38.99	63.26	1.79	4.01	5.09	0.14	0.5	0.5	0.5	0	0.5
x	0_VCN 3176	Constant	1224.29	3176.42	105.25	2190.47	2190.47	72.58					
x	VCH	Binary	344.84	2982.91	19.25	322.36	520.29	3.36	76.5	732.4	793.47	410.15	1329.57
x	V 3176	Binary	1208.34	3137.6	93	2643.91	2666.78	79.05	478.55	925.24	925.24	631.72	1371.93

Рис. 7. Таблиця All machine Sensors вкладки Summary

Вкладка web-застосунку Sensors Basic Stats наляє можливість для перегляду основних статистичних характеристик сенсорів, представлених у таблицях (рис. 8, рис. 9) та гістограм розподілу їх значень.

Sensors Basic Statistics								
Sensor name	Distinct values No	Distinct values (%)	Total No of values	Negative values No	Negative values (%)	Zero values No	Zero values (%)	Type
Filter data:								
CR 28	8	28.57	28	0	0	16	57.14	Numeric
CR 31	8	25.81	31	0	0	17	54.84	Numeric
CR 33	8	24.24	33	0	0	18	54.55	Numeric
CR 376	6	0.02	37636	0	0	37554	99.78	Numeric
CR 261	255835	97.92	261257	0	0	12	0	Numeric
CR 15	3	0.18	1557	0	0	0	0	Numeric
CR 104	2	1.92	104	0	0	55	52.88	Binary
CR 17	2	1.57	127	0	0	66	51.97	Binary
CR 39	2	1.34	149	0	0	77	51.68	Binary
CR 4	1	25	4	0	0	0	0	Constant 1
CR 104	421	4.03	10452	0	0	0	0	Numeric
CR 307	85372	31.84	307282	0	0	0	0	Numeric
CR 38	118728	35.85	388825	0	0	0	0	Numeric

Рис. 8. Таблиця Basic Statistics вкладки Sensors Basic Stats

Перегляд гістограм дозволяє візуально відслідкувати наявність викидів та асиметричність у розподілі значень показників сенсорів, виявити індикативні сенсори та сенсори, які працюють у багаторежимному режимі (рис. 10). Це необхідно врахувати перед подачею даних до прогнозувальної моделі PdM для коректного оновлення її параметрів, спрямованого на більш точне та швидше виявлення аномальних значень.

Sensors Descriptive Statistics															
Sensor	Minimum value	Q5K	Q25K	Median	Average value	Q75K	Q95K	Maximum value	Standard deviation	PMAD	SCV	IQR	Range of values	Kurtosis	Skewness
Filter data:															
CR 28	0	0	0	0	4.61	4.5	21.4	41	9.13	0	1.98	4.5	41	10.05	3.06
CR 31	0	0	0	0	4.55	5	18.5	41	8.72	0	1.92	5	41	10.98	3.15
CR 33	0	0	0	0	4.48	6	17.6	41	8.65	0	1.93	6	41	11.19	3.2
CR 376	0	0	0	0	0.02	0	0	8	0.37	0	21.51	0	8	463.38	23.55
CR 261	0	34.47	51.82	68.82	65.64	88.02	98.99	100	17.93	13.8	0.27	28.2	100	-0.79	-0.39
CR 15	1	1	1	2	1.74	2	4	4	0.95	1	0.54	1	3	0.99	1.36
CR 104	0	0	0	0	0.47	1	1	1	0.5	0	1.06	1	1	-2.03	0.12
CR 17	0	0	0	0	0.48	1	1	1	0.5	0	1.04	1	1	-2.03	0.08
CR 39	0	0	0	0	0.48	1	1	1	0.5	0	1.04	1	1	-2.02	0.07
CR 4	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
CR 104	0.49	0.72	0.72	0.73	0.78	0.85	0.86	0.86	0.06	0.01	0.08	0.13	0.37	-1.43	0.25
CR 307	0.67	0.73	0.73	0.74	0.79	0.86	0.87	0.87	0.06	0	0.08	0.13	0.2	-1.79	0.42
CR 38	0.67	0.73	0.73	0.74	0.79	0.86	0.87	0.87	0.06	0	0.08	0.13	0.2	-1.78	0.42

Рис. 9. Таблиця Basic Descriptive Statistics вкладки Sensors Basic Stats

У прикладі, наведеному на рисунку 10, чітко відслідковується, що показники більшості сенсорів мають 2-3 відокремлені групи значень на графіках розподілу. Це було ідентифіковано як проблему з якістю даних та з'ясовано, що при передачі даних від працівників, які обслуговують технологічну лінію, не було повідомлено про роботу машини у кількох режимах.

Врахування багаторежимної роботи включало: 1) визначення сенсорів і їх значень, які ідентифікують перемикання режимів; 2) визначення тривалості «сліпих зон» для виявлення аномалій на межах періодів перемикання. Із врахуванням цього параметри моделі прогнозування відмов було модифіковано і суттєво підвищено точність виявлення аномалій, які є причиною несправностей.

Результати з аналізом виявлених у сенсорів зазмерлих даних можна переглянути на вкладці Freeze Sensors Analysis у табличному та графічному форматі (рис. 11, рис. 12). Представлена тут інформація дозволяє виявити сенсори з проблемними даними, які не змінюються дуже довго.

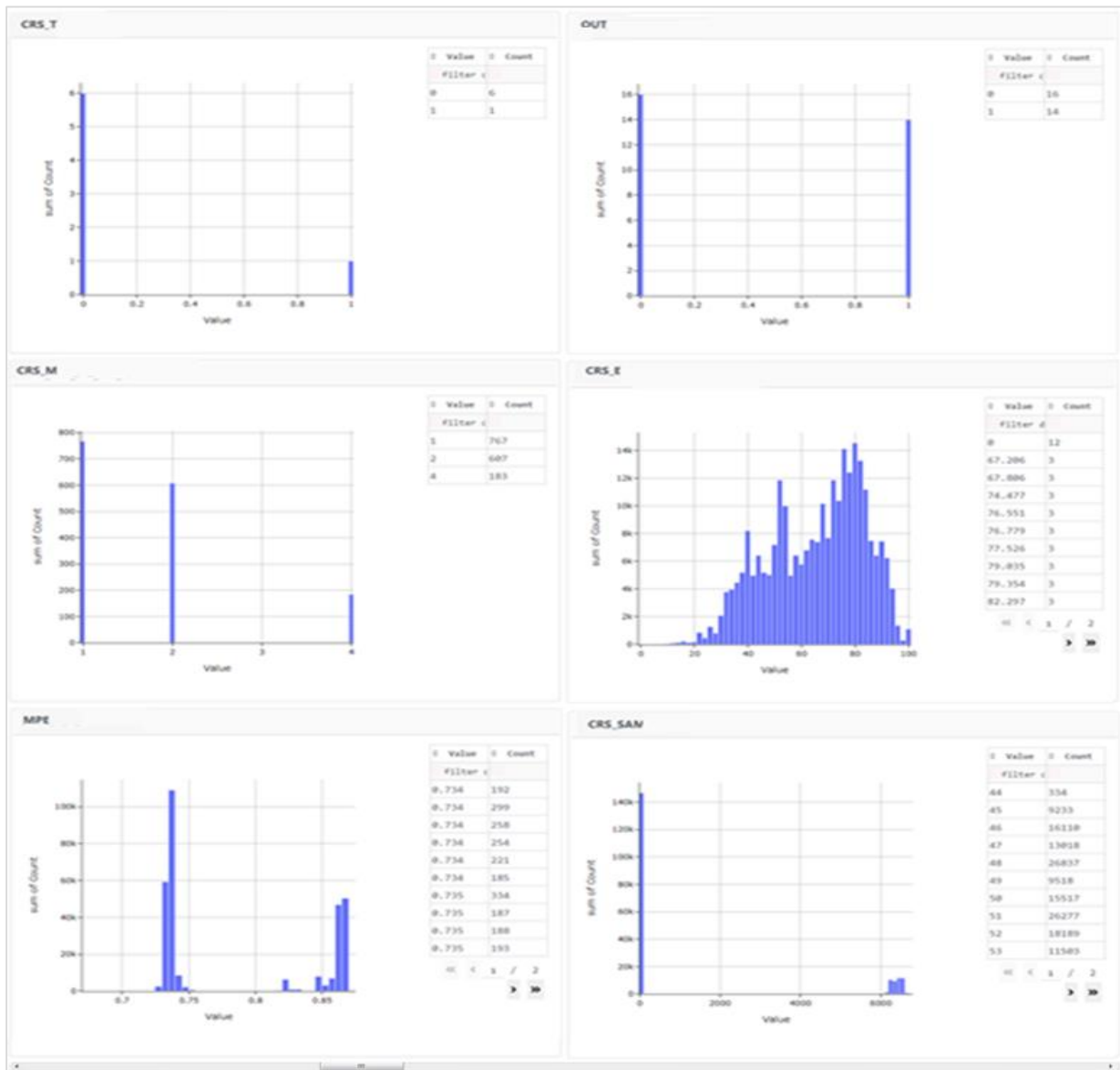


Рис. 10. Гістограми розподілу значень показників сенсорів групи

Sensor	Longest freeze start	Longest freeze end	Longest freeze duration (hrs)	Number of freezes	Total time freeze (hrs)	%freezes from total duration (%)
CRS 6	2022-06-17T11:01:15	2022-08-18T05:58:39	5.5	30	61.5	0.24
CRS 55	2022-09-14T15:02:14	2022-09-16T17:00:09	7.75	3	23	0.09
CRS 07	2022-09-11T23:30:27	2022-09-19T05:51:04	15.5	3	31	0.24
CRS 25	2022-09-11T23:30:27	2022-09-19T05:50:59	36.25	6	69.25	0.27
CRS 66	2022-09-11T23:30:27	2022-09-19T05:50:59	15.5	24	193	0.75
CRS 19	2022-05-18T23:30:33	2022-08-18T05:58:39	12.75	14	58.5	0.23
CRS 9	2022-09-03T22:55:06	2022-09-05T01:17:06	1004.5	27	5933.5	44.05

Рис. 11. Таблиця сенсорів із завмерлими даними

На рисунку 12 один із сенсорів має періоди завмерлих даних довгої тривалості і є проблемним. Це потребує з'ясування причин такого надходження даних, у залежності від чого дані можуть бути вилучені з аналізу (якщо сенсор передає сталі дані) або відкориговані відповідним чином, якщо має місце помилка у агрегації або передачі даних.

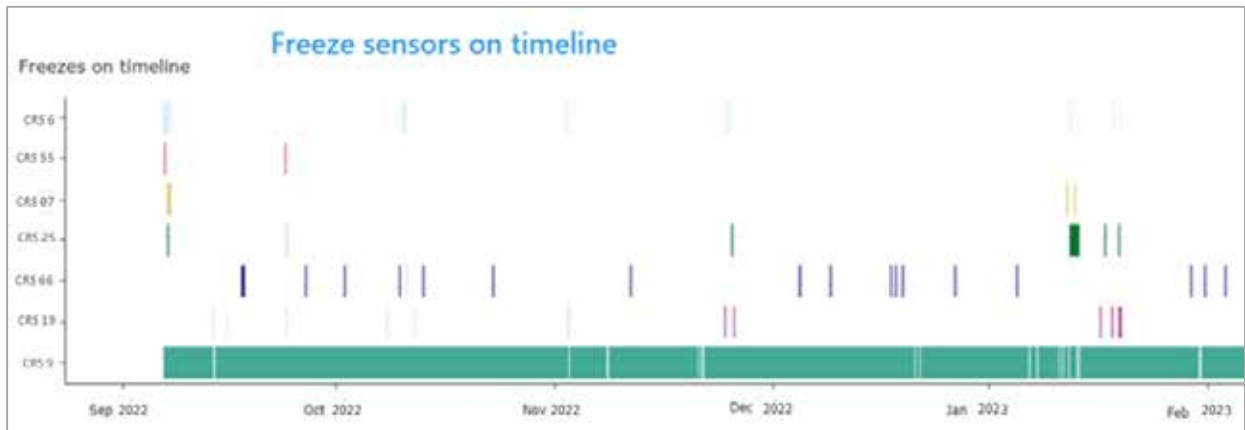


Рис. 12. Візуалізація часових періодів завмерлих даних сенсорів

Інформація про групи сенсорів із високим коефіцієнтом кореляції представлена на вкладці Correlation Analysis веб-застосунку системи у табличному форматі та у вигляді графіків. На рисунку 13 наведено приклад виведення теплової карти коефіцієнтів кореляції.

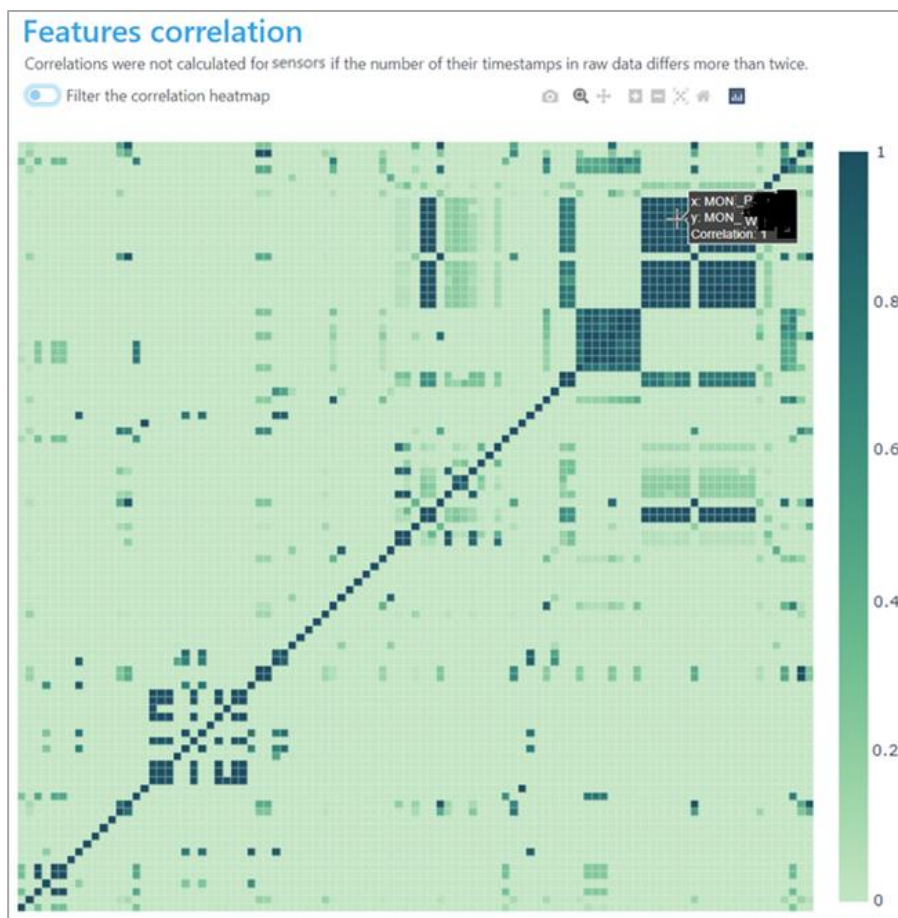


Рис. 13. Теплова карта коефіцієнтів кореляції

Оскільки технологічна лінія зазвичай містить велику кількість сенсорів, реалізовано можливість фільтрування сенсорів та можливість задання порогових значень при виведенні розрахованих коефіцієнтів кореляції з відображенням теплової карти у різних форматах. Більш детально інформацію про кожну групу висококорельованих сенсорів можна переглянути у таблиці вкладки Correlation Analysis.

Аналіз поведінки найбільш корельованих сенсорів кожної групи можна переглядати у вигляді графіків часових рядів значень їх показників. У прикладі, наведеному на рисунку 14, продемонстровано практично однакову поведінку 5 сенсорів групи. З'ясувалося, що причиною такого надходження даних було їх дублювання. Дублікати було вилучено з подальшого аналізу перед подачею даних до моделі прогнозування відмов для оновлення її параметрів.

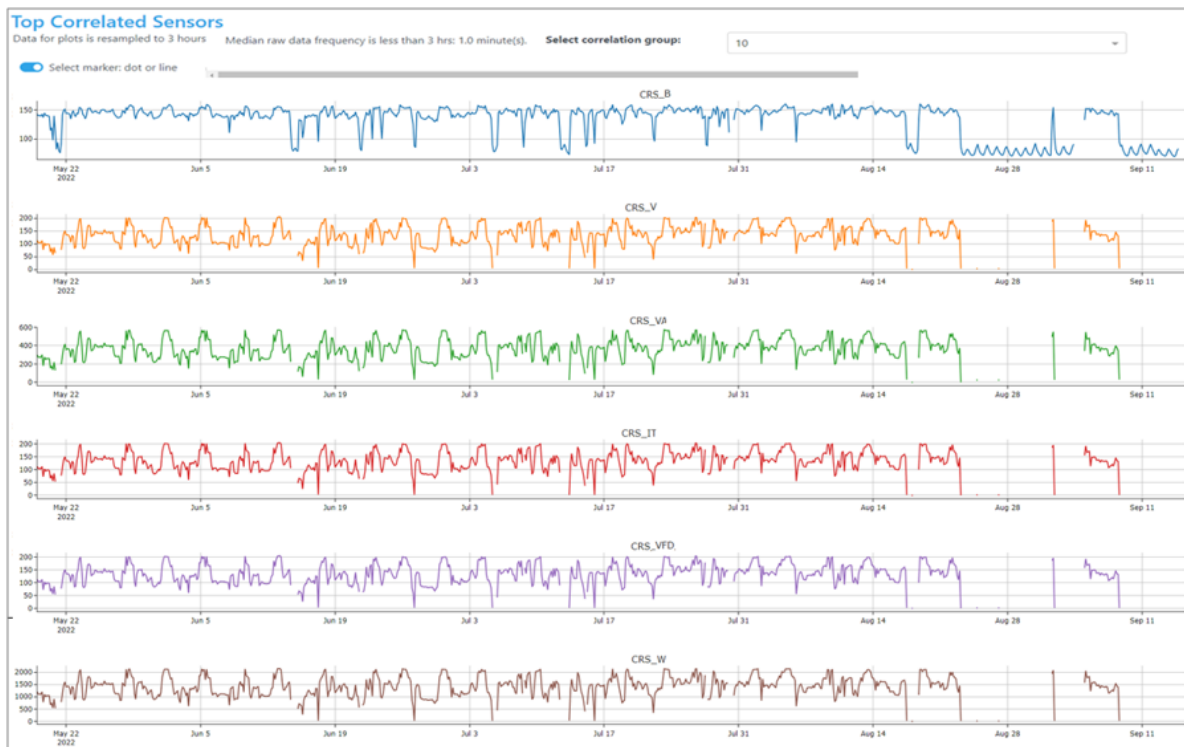


Рис. 14. Графіки часових рядів зі значеннями показників сенсорів групи

Вкладка Gaps and Time Interval Analysis web-застосунку містить результати аналізу часових інтервалів і пропущених даних у часових рядах показників сенсорів. Опис пропущених даних подається у вигляді діаграми Ганта, яка візуально полегшує роботу аналітика з виявлення проблемних даних (рис. 15). Оскільки пропуски можуть свідчити як про низьку якість даних, так і про дуже стабільну роботу пристрою. Це потребує з'ясування способу агрегації даних, в залежності від якого дані можуть бути вилучені з аналізу як зайві або коректно враховані при передачі до прогнозної моделі Predictive Maintenance.

У прикладі, наведеному на рисунку 15, продемонстровано нерівномірне надходження даних. З'ясування причин такої подачі даних дозволило установити, що це було обумовлено підходом до збереження даних на підприємстві: дані передавалися тільки тоді, коли змінювалися. Для врахування такого режиму роботи було додано дані з частотою, уніфікованою з частотою інших сенсорів, а пропуски заповнено останніми наявними значеннями. Передача модифікованих даних до прогнозної моделі для оновлення її параметрів дозволила підвищити точність прогнозу несправностей.

Статистичні показники тривалості інтервалів (мінімальне, максимальне, медіанне та середньоарифметичне значення, проценти 25% і 75%) на вкладці Gaps and Time Interval Analysis представлені у таблиці та у вигляді діаграми розмаху (рис. 16). Розташовані на одному графіку діаграми розмаху дозволяють у зручному для сприйняття форматі візуально порівнювати розподіли тривалості часових інтервалів різних сенсорів.

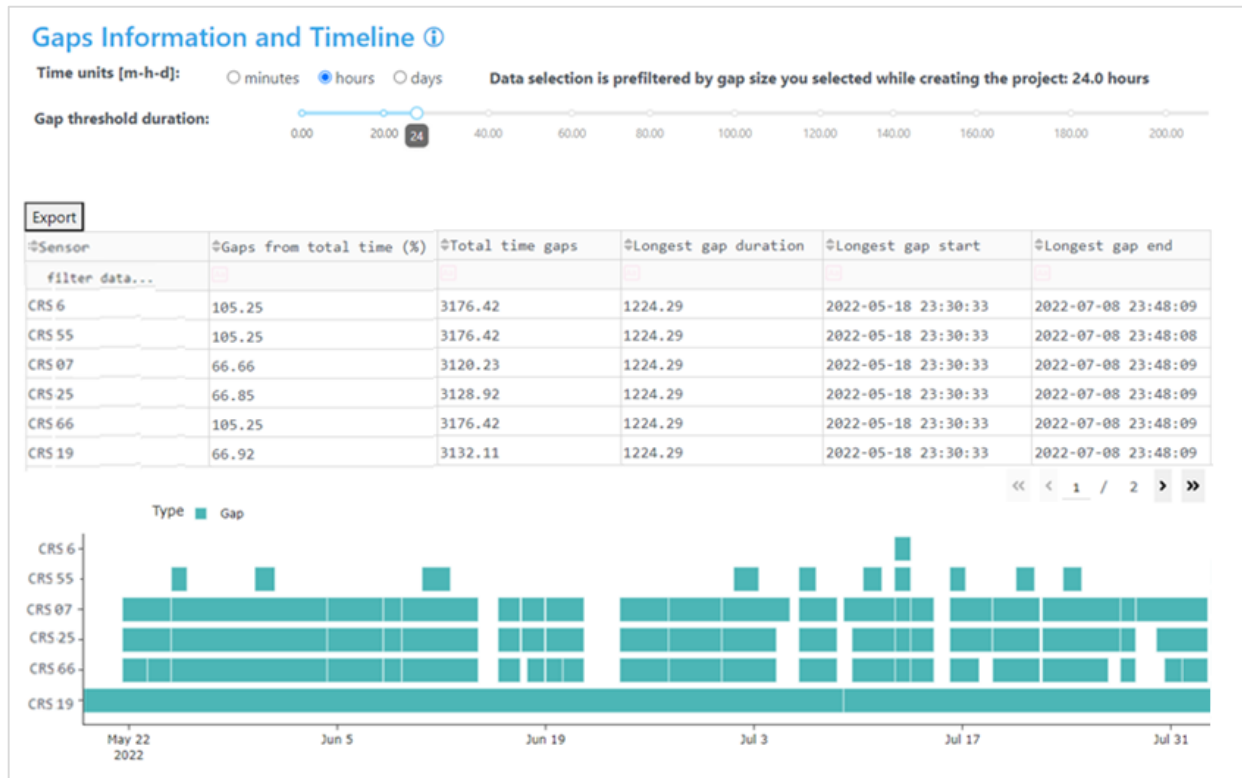


Рис. 15. Візуалізація часових періодів завмерлих даних



Рис. 16. Статистичні показники тривалості інтервалів

Інформація про часові проміжки для кожного сенсора подається також у вигляді точкових діаграм із лініями похибок, аналіз яких дозволяє відділити випадкові похибки від систематичних (рис. 17). У прикладі, наведеному на рисунку 17, наведено графіки, що відображають нерівномірність надходження

даних у часі. Разом із інформацією про пропуски, завмерлі дані та особливості гістограм розподілу значень показників сенсора це дозволяє обґрунтовано обрати спосіб заповнення пропущених значень, метод отримання повторних вибірок, вікно і крок для виявлення аномалій. Такий підхід допомагає отримати додаткову інформацію для оновлення параметрів прогнозних моделей із метою підвищення їх точності та якості.

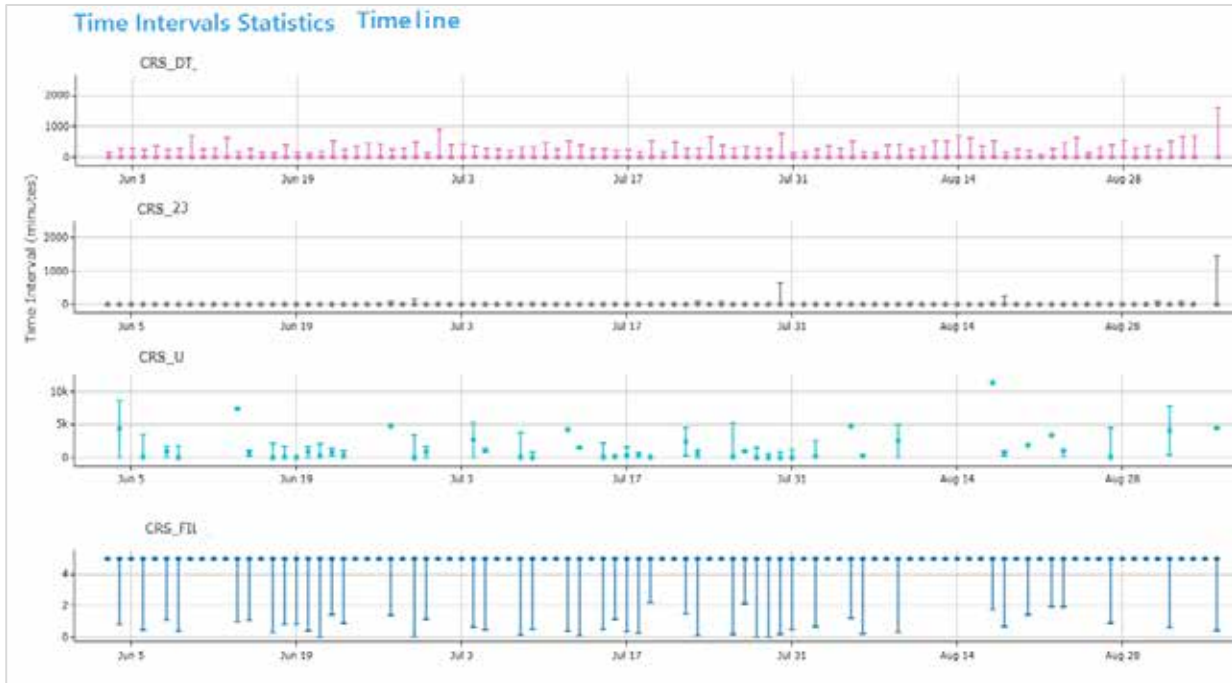


Рис. 17. Точкові діаграми з лініями похибок тривалості часових проміжків

На *четвертому етапі* роботи з інформаційно-аналітичною системою після з'ясування особливостей надходження усіх даних, які було ідентифіковано як джерела можливих проблем, формується перелік апаратно-програмних рішень, спрямованих на підвищення якості даних, які надходять від сенсорів технологічної лінії. До апаратних рішень відносять зміни, які реалізують безпосередньо на виробництві: у конфігурації сенсорів, їх калібруванні та налаштуванні чутливості, ліквідації перебоїв у підключенні IoT-систем. На програмному рівні подальша робота з даними, в залежності від специфіки виявлених проблем, включає внесення відповідних коректив до попередньої обробки даних (уніфікація частоти даних, заповнення пропусків) та визначення аномалій (включення пропущених аномалій та вилучення тих, що були помилково віднесені до аномалій). Дані можуть бути модифіковані відповідним чином або вилучені, якщо вони продубльовані або не несуть корисної інформації. Із врахування усіх внесених змін здійснюється оновлення параметрів моделей прогнозування відмов.

Впровадження системи в обслуговування технологічних ліній важкої промисловості супроводжувалося підвищенням точності та якості прогнозу несправностей. Оцінка точності моделей здійснювалася за показником F1-score, який у середньому підвищився на 10% (рис. 18). Про підвищення якості прогнозних моделей свідчить зменшення часу виявлення проблем, які призводять по несправності обладнання технологічної лінії (рис. 19). Його оцінка здійснювалася за допомогою методу Каплана-Майєра і у середньому це значення було зменшене у 6 разів.

Висновки. Швидкий розвиток технологій Industry 4.0 супроводжується впровадженням прогресивних стратегій прогнозного технічного обслуговування технологічних ліній, які передбачають постійну оцінку стану обладнання у режимі реального часу, допомагаючи максимізувати час його безвідмовної роботи та продуктивність, мінімізуючи загальну вартість обслуговування. Проте експлуатація технологічних ліній в умовах реального виробництва супроводжується зміною у характеристиках обладнання, що потребує корегування та оновлення параметрів моделей, які здійснюють прогнозне технічне обслуговування.

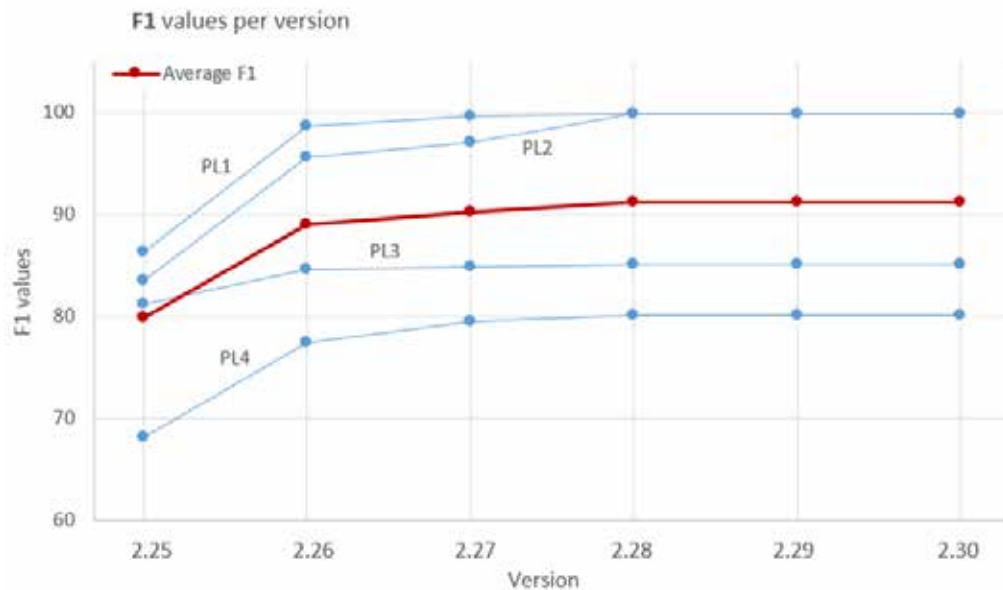


Рис. 18. Підвищення точності прогнозних моделей PdM

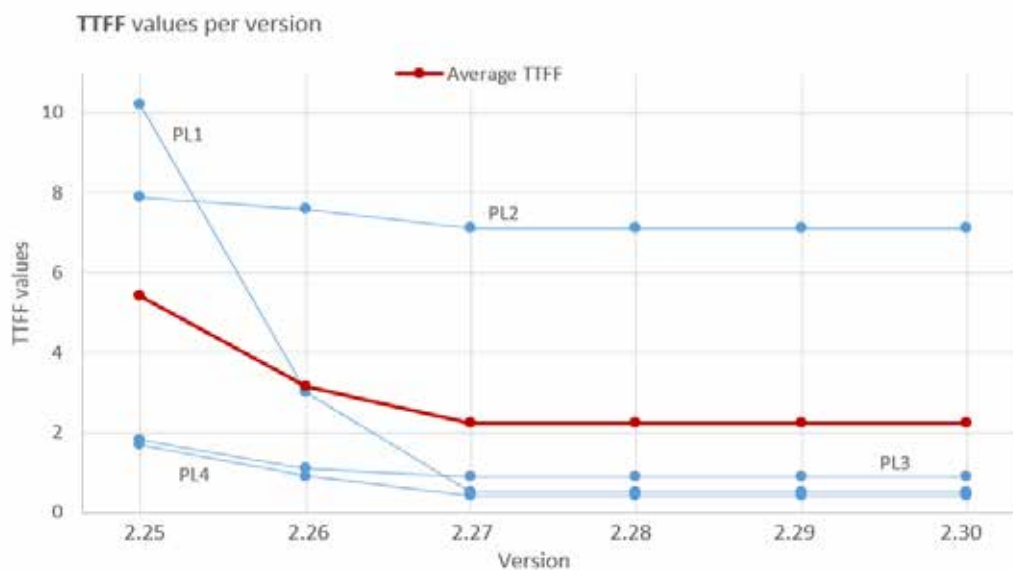


Рис. 19. Зменшення часу виявлення проблем, які призводять до несправності технологічної лінії

Дослідження факторів, які викликають зниження точності прогнозу моделей PdM, дозволило установити, що до проблемних можна віднести сенсори, дані яких мають: від'ємні значення, суттєву кількість нульових та пропущених значень або невелику кількість окремих значень; високі значення коефіцієнту варіації та ексцесу; неуніфіковані з іншими сенсорами і довгі часові інтервали між сусідніми значеннями часового ряду показників; довгі тривалості часових проміжків пропущених і завмерлих даних; високі коефіцієнти кореляції з групою інших сенсорів. Це дало можливість обґрунтувати вибір кореляційного аналізу і методів описової та контекстної статистики для аналізу показників великої кількості сенсорів технологічних ліній із метою виявлення проблем із якістю даних.

На основі запропонованого підходу було розроблено інформаційно-аналітичну систему, яка на етапі формування набору даних автоматично виявляє потенційні джерела проблем із якістю даних, що можуть вплинути на точність прогнозування несправностей. Результати експериментальної апробації засвідчили, що інформація з даними всіх сенсорів стала доступною одночасно. Це дає можливість порівнювати резолюцію різних груп сенсорів та обирати прийнятні для усіх сенсорів значення. Було

прискорено та покращено в залежності від специфіки виробництва вибір методу заповнення пропусків у даних, виявлення та аналіз викидів, аномалій, груп сенсорів із високим коефіцієнтом кореляції. Аналіз тривалості деградації та кореляції між аномаліями показників сенсорів дає змогу відслідковувати зміни корельованих аномалій із часом наближення збою і дозволяє відкоригувати спосіб відбору даних для подальшого аналізу з метою їх раннього виявлення.

Впровадження розробленої системи для прогнозного технічного обслуговування технологічних ліній важкої промисловості дозволило покращити відбір і підготовку даних для подальшого аналізу, супроводжувалося підвищенням точності прогнозування відмов і зменшенням інтервалів часу між виникненням несправностей та їх виявленням. Що свідчить про підвищення якості прогнозних моделей Predictive Maintenance та запобігає виходу з ладу і простою обладнання технологічних ліній, подовжуючи загальний термін служби життєво важливих активів.

Список використаних джерел:

1. Болюбаш Н. М., Фінькова О. В. Система аналізу даних для прогнозного технічного обслуговування технологічних ліній. *Матеріали XXVII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Могилянські читання – 2024: Досвід та тенденції розвитку суспільства в Україні: глобальний, національний та регіональний аспекти». Технічні науки*. Миколаїв: Вид-во ЧНУ імені П. Могили. 2024. С. 163–167. URL: <https://dSPACE.chmnu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/2507/1/Технічні%20науки.pdf#page=165>.
2. Темчур В. С., Баран Т. Г. Методи глибокого навчання моделей для прогнозного обслуговування. *Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2023. Т. 34 (73), № 6. С. 155–162. URL: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/23>.
3. Achouch M., Dimitrova M., Ziane K., Sattarpanah Karganroudi S., Dhouib R., Ibrahim H., Adda M. On Predictive Maintenance in Industry 4.0: Overview, Models, and Challenges. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, No 16. P. 8081. URL: <https://doi.org/10.3390/app12168081>.
4. Baptista M., Sankararaman S., et al. Forecasting fault events for predictive maintenance using data-driven techniques and ARMA modeling. *Computers & Industrial Engineering*. 2018. Vol. 115. P. 41–53. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.107060>.
5. Blann D. Maximizing the P-F interval through condition-based maintenance. URL: <https://www.maintworld.com/Applications/Maximizing-the-P-F-Interval-Through-Condition-Based-Maintenance>.
6. Buyske S., Fagerstrom R., Ying Z. A class of weighted log-rank tests for survival data when the event is rare. *Journal of the American Statistical Association*. 2020. Vol. 95, No 449. P. 249–258. URL: <https://doi.org/10.1080/01621459.2000.10473918>.
7. Geisbush, J., Ariaratnam, S. T. Reliability centered maintenance (RCM): literature review of current industry state of practice. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 2023. Vol. 29, No. 2. PP. 313–337. URL: <https://doi.org/10.1108/JQME-02-2021-0018>.
8. Hamasha M. M., Bani-Irshid A. H., Al Mashaqbeh S., et al. Strategical selection of maintenance type under different conditions. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13, P. 15560. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42751-5>.
9. Horrell M., Reynolds L., McElhinney A. Data Science in Heavy Industry and the Internet of Things. *Harvard Data Science Review*. 2020. Issue 2 (2). URL: <https://doi.org/10.1162/99608f92.834c6595>.
10. Keleko A. T., Kamsu-Foguem B., Ngouna R. H., Tongne A. Artificial Intelligence and Real-Time Predictive Maintenance in Industry 4.0: a bibliometric analysis. *AI and Ethics*. 2022. Vol 2. P. 533–577. URL: <https://doi.org/10.1007/s43681-021-00132-6>.
11. Li L., Liu M., Shen W., Cheng G. An expert knowledge-based dynamic maintenance task assignment model using discrete stress-strength interference theory. *Knowledge-Based Systems*. 2017. Vol. 131. P.135–148. URL: <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2017.06.008>.
12. Nokeri T. C. Dash Bootstrap Components. In: *Web App Development and Real-Time Web Analytics with Python*. Pub.: Berkeley, CA. 2022. P. 87–97. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4842-7783-6_6.
13. Oliynyk K. 5 Use Cases of Predictive Maintenance using IoT. URL: <https://webbylab.com/blog/use-cases-of-iot-based-predictive-maintenance>.
14. Ong H., Niyato D., Yuen C. Predictive Maintenance for Edge-Based Sensor Networks. 2020. URL: <https://arxiv.org/pdf/2007.03313>.
15. Patel M., Vasa J., Patel B. Predictive Maintenance: A Comprehensive Analysis and Future Outlook. Published in *2nd International Conference on Futuristic Technologies (INCOFT)*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1109/INCOFT60753.2023.10425122>.
16. Rudin C. Stop explaining black box machine learning models for high stakes decisions and use interpretable models instead. *Nature Machine Intelligence*. 2019. Vol. 1, No 5. P. 206–215. URL: <https://doi.org/10.1038/s42256-019-0048-x>.
17. Serradilla O., Zugasti E., Zurutuza U. Deep Learning Models for Predictive Maintenance: A Survey. 2020. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.03207>.
18. Sharma J., Mittal M.L., Soni G. Condition-based maintenance using machine learning and role of interpretability: a review. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. Vol. 15. P. 1345–1360. URL: <https://doi.org/10.1007/s13198-022-01843-7>.
19. Sikorska J., Hodkiewicz M., Ma L. Prognostic modelling options for remaining useful life estimation by industry. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2011. Vol. 25, No 5. P. 1803–1836. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.11.018>.

20. Ucar A., Karakose M., Kırımca N. Artificial Intelligence for Predictive Maintenance Applications: Key Components, Trustworthiness, and Future Trends. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, No 2. P. 898. URL: <https://doi.org/10.3390/app14020898>.
21. Wheeler K.R., Kurtoglu T., Poll S.D. A survey of health management user objectives related to diagnostic and prognostic metrics. In *Proceedings International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. 2009. P. 1287–1298. URL: <https://doi.org/10.1115/DETC2009-87073>.
22. Yuan M., Wu Y., Lin L. Fault diagnosis and remaining useful life estimation of aero engine using LSTM neural network. In *Proceedings International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS)*. IEEE. 2016. P. 135–140. URL: <https://doi.org/10.1109/AUS.2016.7748035>.
23. Zhang C., Lim P., Qin A. K., Tan K. C. Multiobjective Deep Belief Networks Ensemble for Remaining Useful Life Estimation in Prognostics. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2017. Vol. 28, No 10. P. 2306–2318. URL: <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2016.2582798>.

УДК 004.056.55:004.932.4:004.9

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.4>

Денис БУКАТОВ

викладач кафедри математичних дисциплін та інноваційного проектування,
Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет», denys.bukatov@e-u.edu.ua
ORCID: 0009-0009-9320-2181

Яніна КОЛОДІНСЬКА

старший викладач кафедри математичних дисциплін та інноваційного проектування,
Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет», yanina.kolodinska@e-u.edu.ua
ORCID: 0000-0002-3330-7565
Scopus Author ID: 57466561800

Ігор ФРОЛОВ

викладач кафедри математичних дисциплін та інноваційного проектування
Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет», igor.frolov@e-u.edu.ua
ORCID: 0009-0004-1163-8787

Олег РОМАНЕНКО

викладач кафедри математичних дисциплін та інноваційного проектування,
Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет», oleg.romanenko@e-u.edu.ua
ORCID: 0009-0008-4703-217X

**АКТУАЛЬНІ ЗАГРОЗИ ТА ЗАХИСНІ СТРАТЕГІЇ ДЛЯ ВІЗУАЛЬНОГО КОНТЕНТУ
В ІНТЕРАКТИВНИХ СИСТЕМАХ ІТ ПРОЄКТІВ**

Анотація. У сучасних умовах цифровізації та стрімкого розвитку штучного інтелекту захист візуального контенту набуває особливої актуальності. Зростання загроз підробки, викрадення та несанкціонованого використання цифрових зображень обумовлює потребу у вдосконаленні методів безпеки та розробці інноваційних стратегій протидії порушенням авторських прав.

Мета роботи. Мета даної роботи полягає в аналізі сучасних методів захисту візуального контенту в інтерактивних ІТ-проектах, з урахуванням стрімкого розвитку цифрових технологій, зростання ризиків підробки цифрового контенту, недосконалості правових норм у сфері інтелектуальної власності та впливу штучного інтелекту.

Методологія. У дослідженні застосовано метод порівняльного аналізу існуючих технік захисту цифрового контенту, включаючи шифрування, водяні знаки, обмеження доступу, застосування метаданих, нейромережеві підходи, а також вивчено методи адаверсаріальних атак, зокрема технологію Nightshade. Особливу увагу приділено інтеграції заходів захисту на рівні інтерфейсів користувача та технічних обмежень у вебсередовищах, що дозволяє забезпечити комплексний підхід до безпеки мультимедійних даних.

Наукова новизна. Наукова новизна полягає у комплексному розгляді новітніх технологій захисту візуального контенту від автоматизованого збору і використання штучними інтелектами, виявленні ролі метаданих для підтвердження автентичності цифрових зображень, а також запропонованні сучасних практик застосування нейромереж для виявлення маніпуляцій із візуальним контентом з урахуванням актуальних викликів кібербезпеки.

Висновки. Стаття підкреслює важливість багаторівневого захисту цифрового контенту з використанням поєднання різних підходів – від шифрування і водяних знаків до нейромережевих технологій та спеціальних протиадаверсаріальних методів. Виявлено, що ефективна стратегія має охоплювати як технічні, так і організаційні заходи безпеки, забезпечуючи гнучкість систем захисту в умовах постійно зростаючих цифрових загроз. Перспективи подальших досліджень визначені у напрямку розробки нових алгоритмів захисту, інтеграції їх у ІТ-продукти, та оптимізації існуючих методів для підвищення стійкості до сучасних викликів.

Ключові слова: методи захисту, нейромережі, адаверсаріальні атаки, захист цифрового контенту, цифровий контент.

Denys BUKATOV, Yanina KOLODINSKA, Ihor FROLOV, Oleh ROMANENKO. CURRENT THREATS AND PROTECTION STRATEGIES FOR VISUAL CONTENT IN INTERACTIVE IT PROJECT SYSTEMS

Abstract. In the context of rapid digitalization and the accelerated development of artificial intelligence technologies, protecting visual content has become increasingly important. The growing threats of forgery, theft, and unauthorized use of digital images necessitate the improvement of security methods and the development of innovative strategies to counter violations of intellectual property rights.

Purpose of the study. The aim of this work is to analyze modern methods of protecting visual content in interactive IT projects, taking into account the rapid development of digital technologies, the increasing risks of digital content forgery, the imperfections of intellectual property regulations, and the influence of artificial intelligence.

Methodology. The study employs a comparative analysis of existing digital content protection techniques, including encryption, watermarking, access restrictions, metadata application, and neural network-based approaches. It also examines

adversarial attack methods, particularly the Nightshade technology. Special attention is paid to the integration of user interface-level protections and technical restrictions in web environments, ensuring a comprehensive approach to the security of multimedia data.

Scientific novelty. *The scientific novelty lies in the comprehensive consideration of advanced technologies for protecting visual content from automated collection and use by artificial intelligence systems. The study highlights the critical role of metadata in verifying the authenticity of digital images and suggests modern practices for applying neural networks to detect visual content manipulations, taking into account current cybersecurity challenges.*

Conclusions. *The article emphasizes the importance of multi-level protection of digital content by combining various approaches – from encryption and watermarking to neural network technologies and specialized adversarial methods. It has been found that an effective strategy must encompass both technical and organizational security measures, ensuring flexibility of security systems amid the ever-growing digital threats. Future research directions are defined in the development of new protection algorithms, their integration into IT products, and the optimization of existing methods to enhance resilience to modern challenges.*

Key words: *protection methods, neural networks, adversarial attacks, digital content protection, digital content.*

Постановка проблеми та її актуальність. Захист цифрової інформації є надзвичайно важливою умовою у сучасних ІТ-проектах, де головну роль відіграє візуальна взаємодія з користувачем.

Особливо це важливо у сферах розробки та створення візуально-цифрового контенту. Зображення, 3D-моделі, візуальні елементи інтерфейсу, анімації та відео часто є не лише інструментами комунікації, а й частиною критично важливої логіки застосунку. При цьому саме ці компоненти найчастіше стають об'єктами підробки, викрадення або несанкціонованого використання – як з боку користувачів, так і автоматизованих систем штучного інтелекту.

З розвитком інструментів реверс-інжинірингу, автоматичного видалення водяних знаків, дипфейків, генеративних моделей та хмарних сервісів для зберігання візуального контенту зросли і ризики. Проблема полягає не лише у витоку даних або несанкціонованому доступі, а й у можливості маніпулювання зображеннями в інтерактивному середовищі, підміні вмісту, або використанні оригінальних візуальних елементів для тренування сторонніх ШІ-моделей без згоди правласника.

Для захисту візуального контенту є різноманітні методи захисту, такі як шифрування, обмеження доступу, водяні знаки, навмисне зменшення роздільної здатності зображень та інші.

Додаткову складність становить потреба збалансувати захист із безперебійною інтерактивністю: надмірні обмеження або погіршення якості відображення може негативно вплинути на користувацький досвід.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання захисту візуального контенту в сучасних ІТ-проектах стає дедалі актуальнішим у зв'язку з широким використанням цифрових зображень, відео, UI-компонентів та іншого контенту. Розвиток хмарних технологій, зростання популярності гібридних застосунків, поширення генеративного ШІ та нових форматів зберігання й передачі мультимедійних даних обумовлюють необхідність формування нових стратегій цифрового захисту.

У роботах останніх років особлива увага приділяється технологіям водяного маркування [10, с. 110; 4, с. 2224–2225]. Так, М. Begum і М. Uddin підкреслюють значення видимих і прихованих watermark для підтвердження авторства. У дослідженні А. F. Eldaoushy та ін. запропоновано гібридний підхід до вставки водяних знаків із використанням спектральних перетворень.

Мета статті полягає у проведенні більш детального аналізу сучасних методів захисту візуального контенту в інтерактивних ІТ-системах, таких як вебзастосунки, мобільні платформи, ігрові проекти та. Основна увага приділяється методам, що реалізуються у кінцевих продуктах: шифрування графічних ресурсів, застосування видимих і невидимих водяних знаків (Begum & Uddin, 2020; Eldaoushy et al., 2023), захист на основі метаданих і цифрових підписів (El-Hajj et al., 2019), а також технологіям протидії ШІ-моделям, як-от Nightshade (Zhao et al., 2023).

Виклад основного матеріалу дослідження. Для захисту цифрових зображень є дуже багато різноманітних методів захисту, такі як шифрування, водяні знаки, обмеження доступу, навмисне зменшення роздільної здатності та інші методи.

Одним із базових підходів до захисту візуального контенту є шифрування, яке передбачає перетворення вмісту у вигляд, незрозумілий для стороннього користувача. На практиці застосовують як симетричне AES шифрування, так і асиметричні алгоритми на кшталт RSA, а для мультимедійних даних використовуються спеціалізовані протоколи безпечної передачі [3, с. 186958–186973].

Нейромережі та машинне навчання можуть бути застосовані до перевірки цифрових зображень. Наприклад, застосування нейронних мереж для виявлення змін колірних діапазонів та інших форм маніпулювання зображеннями дозволяє виявляти спроби підробки цих зображень.

Захист цифрових зображень вимагає використання різноманітних та всебічних технік та підходів.

В художній індустрії фахівці можуть використовувати різноманітні методи та інструменти для захисту свого контенту. Одним з таких методів є водяний знак, який використовується для захисту авторських прав та належності зображення до конкретного автора.

Варто зазначити, що в сучасних IT-проектах, де розробка візуального контенту інтегрується у бізнес-моделі цифрових проєктів, питання безпеки зображень набуває практичного значення вже на етапі формування інноваційної ідеї. Зокрема, дослідження Колодінської Я.О., Скляренко О.В. та Ніколаєвського О.Ю. показує, що цифрові сервіси активно використовуються як платформи для реалізації стартапів, де візуальний контент є ключовим елементом презентації, маркетингу та взаємодії з цільовою аудиторією [11, с. 53–60]. У такому контексті захист графічних матеріалів має не лише технічний, а й стратегічний характер.

Іншим методом захисту є техніка блокування копіювання, що дозволяє обмежити можливість копіювання зображень без дозволу автора. Ця техніка може бути реалізована за допомогою вбудованих обмежень в програмах для перегляду та завантаження зображень або шляхом застосування спеціальних налаштувань функціоналу сайту.

Ще одним методом захисту а точніше перевірки та отримання додаткової інформації про зображення є використання метаданих, які дозволяють дізнатись додаткові дані про зображення.

Метадані дозволяють зберігати додаткову інформацію: дані про автора, дату створення чи дані програмного забезпечення. У сучасних підходах нерідко застосовують приховане маркування через контрольні суми або цифрові підписи, що дає змогу простежити автентичність візуального матеріалу навіть після його редагування [5].

Також, дуже важливо проводити регулярну перевірку мережі на наявність незаконного використання зображень та вживати заходів щодо їх вилучення. З цим дуже добре допомагають сервіси пошуку за зображенням, зокрема Google Reverse Image Search або TinEye, а також спеціалізовані платформи захисту авторських прав, наприклад Pixsy чи Digimarc, що можуть відслідкувати копії контенту в мережі.

Серед інших методів є такі варіанти як використання промптів, шуму, обмеження функціональності на сайтах і тд.

Найпоширеніші варіанти:

Обмеження доступу (Access restrictions)

У практиці розробки вебзастосунків обмеження доступу до зображень може бути реалізоване через заборону функцій контекстного меню за допомогою JavaScript-функцій, наприклад, `event.preventDefault()` або `return false`; у відповідь на події типу `contextmenu`. Хоча цей метод не гарантує абсолютного захисту, він ускладнить базове копіювання зображення. Встановлення невидимих перекриттів на елементи графіки або запровадження політик безпеки на рівні заголовків HTTP, таких як Content Security Policy (CSP), що обмежує джерела, з яких може бути завантажений контент, а також забороняє вбудовування зображень на сторонніх ресурсах (anti-hotlinking) [9].

Інтеграція промптів (Prompts integration)

Використання промптів у зображеннях може стати ефективним способом ускладнення або запобігання використанню зображень для навчання ШІ без дозволу.

Промпти, які вбудовують текстові або бінарні дані в зображення, дозволяють передавати приховану інформацію, що може бути використана для верифікації автентичності зображення або його власника, або як протилежний варіант може використовуватись для приховування шкідливого «коду» або «функцій» всередині здається невинних зображень, або самих моделей які потім можуть бути поширені через електронну пошту, соціальні мережі або звичайні сайти. Як приклад це небезпечно у випадках, якщо використовується модель ШІ яка може не тільки аналізувати а й виконувати «функції» записані у зображення.

Шум (Noise)

Техніка додавання шуму вимагає ретельного підходу до вибору типу та інтенсивності шуму. Важливо збалансувати між маскуванням інформації та збереженням якості зображення. Один із способів – використання чорно-білого шуму, який випадково змінює значення пікселів на чорне або біле. Цей метод ефективний для зображень з високим контрастом, де такі точки будуть менш помітні. Для більш плавних зображень застосовується спектральний шум, що вносить зміни на рівні частотних компонентів, роблячи зміни менш очевидними для людського ока, але ускладнюючи автоматизовану обробку зображень.

Колірні канали (Color channels)

Ще як варіант іноді використовують модифікацію каналів зображення. Варіювання кольорових каналів у спосіб, який робить дані непридатними для навчання ШІ [8] і загалом робить зображення менш чітким та візуально перенасиченим, наприклад, через алгоритми, що змішують колірні гістограми

зображення [1]. Найбільша проблема методу у тому що у grayscale зображені не зсунеш канал кольору так як залишається всього один варіант градації каналу кольору, від чорного до білого. Цей grayscale можна призначити будь якому колірному каналу але лише для одного єдиного і відображається як під ефектом одноколірного фільтру, інакше зображення втрачає колірну глибину.

Адаверсаріальні атаки (Adversarial attacks)

Також для захисту можна приміняти «адаверсаріальні атаки».

Адаверсаріальні атаки – це методи маніпуляції даними для створення ситуацій в яких алгоритми машинного навчання або нейронні мережі приймають неправильні рішення при аналізі даних. Цей процес включає зміну або створення вхідних даних, які на перший погляд здаються нормальними, але спричиняють помилки в роботі алгоритмів. Загалом це спеціально модифіковані вхідні дані, які призводять до помилок у класифікації зображень або прогнозуванні моделі ШІ [6].

Наприклад, до зображення додаються незначні зміни (шум), які майже непомітні для людського ока, але значно змінюють результат класифікації.

Такі типи атак використовують для:

- маніпуляції вхідними даними так, щоб вони уникли виявлення або неправильного класифікування
- модифікації (отруєння) навчальних даних для введення помилок у модель
- відтворення або отримання доступу до внутрішньої логіки або параметрів моделі

Водяні знаки (Watermark)

Водяні знаки, як правило, використовуються для додавання невидимих або малопомітних для ока штампів на зображення, що дозволяє захистити авторські права та запобігти незаконному розповсюдженню. Такі водяні знаки можуть бути вбудовані у формі символів, логотипів або інших графічних елементів, які стають помітними тільки після спеціальної обробки зображення та його ретельного обстеження, забезпечуючи ефективний захист без значного зниження якості. Або є ще варіанти з використанням навпаки сильно помітних або напівпрозорих водяних знаків або їх модифікованою версією з використанням «Blur» методів.

Nightshade

Nightshade – це технологія яка дозволяє захищати цифрові зображення від несанкціонованого використання, включаючи захист від тренування штучного інтелекту на основі цих зображень шляхом їх модифікації. Це теж є методом який відносять до типу адаверсаріальних атак [2].

Основна ідея Nightshade полягає в тому, щоб змінювати пікселі зображення таким чином, щоб вони виглядали для людини нормально, але створювали значні труднощі для алгоритмів ШІ. (Мікрорівневі зміни (Pixel-Level Alterations))

Зміни на рівні пікселів викликають помилки у моделях машинного навчання, які використовуються для розпізнавання або класифікації зображень.

Зображення, оброблені Nightshade, можуть негативно вплинути на модель ШІ. Це означає, що алгоритми не зможуть правильно інтерпретувати ці зображення або використовувати їх для навчання моделей. Часто результат такого методу залежить від кількості «отруєних» зображень які використовуються у моделях ШІ, чим їх більше тим довше модель буде аналізувати дані.

Крім Nightshade, є ще технологія Glaze, яка змінює стилістичні характеристики зображення, ускладнюючи для генеративних моделей точне копіювання художнього стилю автора без помітного спотворення самого зображення візуально, хоча технологія не ідеальна але це принаймні уповільнює час навчання ШІ-моделі специфічним характеристикам стилю автора.

Висновки. У цій статті було проведено всебічний аналіз сучасних загроз і методів захисту візуального контенту, що використовується в інтерактивних системах ІТ-проєктів. Було встановлено, що сучасні методи захисту контенту, такі як промпти, шум, модифікація колірних каналів, водяні знаки, обмеження доступу та нейромереві підходи, є ефективними для забезпечення безпеки цифрового контенту. Використання цих методів показало свою доцільність у поточному стані індустрії.

Проаналізовані техніки – включаючи шифрування, обмеження доступу, використання метаданих, watermarking, модифікацію колірних каналів, а також додавання шуму та застосування спеціальних «промптів» – демонструють свою ефективність у захисті зображень у цифровому середовищі. Значну увагу приділено нейромеревим та машинно-навчальним підходам, які застосовуються як для виявлення маніпуляцій, так і для формування нових засобів цифрової ідентифікації.

Перспективи подальшого розвитку у даному напрямі включають:

- інтеграцію захисних технологій у сучасні платформи та інструменти;
- розробку нових алгоритмів та методів, які покращать стійкість додатків та програм до різних типів атак вцілому;
- оптимізацію та адаптацію існуючих методів захисту для підвищення та пролонгованості підтримки продуктів старого та нового типу.

Список використаних джерел:

1. Колодінська Я. О., Склярєнко О. В., Ніколаєвський О. Ю. Практичні аспекти розробки інноваційних бізнес-ідей з використанням цифрових сервісів. *Економіка і управління*. 2022. № 4. С. 53–60. DOI: <https://doi.org/10.36919/2312-7812.4.2022.53>.
2. Kumar S. A review on attacks and defense strategies in generative AI models. *Artificial Intelligence Review*. 2023. DOI: [10.1007/s10462-023-10450-2](https://doi.org/10.1007/s10462-023-10450-2).
3. Liu S., Pan Z., Song H. An improved image watermarking method based on DCT and fractal coding. *Signal Processing: Image Communication*. 2021. Vol. 94. P. 116205.
4. Begum M., Uddin M.S. Digital image watermarking techniques: A review. *Information*. 2020. Vol. 11. No. 2. P. 110.
5. Eldaoushy A. F., Desouky M. I., El-Dolil S. A., El-Fishawy A. S., Abd El-Samie F. E. Efficient hybrid digital image watermarking. *Journal of Optics*. 2023. Vol. 52. No. 11. P. 2224–2238.
6. Epic Games. Unreal Engine 5 Documentation: Pak File Encryption. 2022. URL: <https://docs.unrealengine.com/5.0/en-US/encrypting-pak-files-in-unreal-engine> (дата звернення: 25.04.2025).
7. Goodfellow I. J., Shlens J., Szegedy C. Explaining and harnessing adversarial examples. *Proceedings from ICLR 2015: International Conference on Learning Representations*. 2015. URL: <https://arxiv.org/abs/1412.6572> (дата звернення: 25.04.2025).
8. Figma Inc. Security at Figma. 2023. URL: <https://www.figma.com/security> (дата звернення: 25.04.2025).
9. Zhao B., Yang J., Li Y., et al. Nightshade: Poisoning data to prevent unauthorized training on generative models. *Proc. of the ACM Conf. on Computer and Communications Security (CCS '23)*. 2023. URL: <https://nightshade.cs.uchicago.edu> (дата звернення: 25.04.2025).
10. Robust watermarking of medical images using DICOM standards. *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. Article 11820. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91035-z>.
11. El-Hajj M., Fadlallah A., Chamoun M., Serhrouchni A., et al. Secure and lightweight image encryption technique for IoT applications. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 186958–186973.

УДК 004.89:336.7

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.5>

Тетяна ВАКАЛЮК

доктор педагогічних наук, професор,
завідувач кафедри інженерії програмного забезпечення,
Державний університет «Житомирська політехніка»,
tetianavakaliuk@gmail.com
ORCID: 0000-0001-6825-4697

Дмитро АНТОНЮК

кандидат педагогічних наук, доцент,
доцент кафедри інженерії програмного забезпечення,
Державний університет «Житомирська політехніка»,
докторант Інституту цифровізації освіти НАПН України, dmitry_antonyuk@yahoo.com
ORCID: 0000-0001-7496-3553

Сергій ДУНЄВ

асистент кафедри інженерії програмного забезпечення,
Державний університет «Житомирська політехніка»,
kipz_dss@ztu.edu.ua
ORCID: 0009-0006-2041-0885

Олег ТАЛАВЕР

асистент кафедри інженерії програмного забезпечення,
Державний університет «Житомирська політехніка»,
olegtalaver@gmail.com
ORCID: 0000-0002-6752-2175

Ілля ДОВГАЛЮК

здобувач, Державний університет «Житомирська політехніка», illadovgaluk9@gmail.com
ORCID: 0009-0003-5842-1502

МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ РОЗРОБКИ ФІНАНСОВОГО ПОМІЧНИКА

Анотація. Мета роботи. Дослідити можливості застосування технологій штучного інтелекту (машинного навчання, обробки природної мови, глибокого навчання, систем рекомендацій та комп'ютерного бачення) для створення ефективного фінансового помічника, здатного аналізувати дані користувачів, прогнозувати фінансові показники, виявляти аномалії в транзакціях, надавати персоналізовані рекомендації щодо оптимізації бюджету та автоматизувати процеси фінансового планування.

Методологія. У статті застосовано системний аналіз сучасного стану розвитку фінансових платформ та технологій штучного інтелекту. Проведено порівняльне дослідження можливостей різних технологій ШІ для інтеграції у фінансові системи. Здійснено класифікацію фінансових платформ за функціональним призначенням. Виконано аналіз практичних прикладів застосування штучного інтелекту у фінансовій сфері на основі наукових публікацій та галузевих досліджень. Застосовано методи синтезу інформації для визначення ключових напрямків розвитку інтелектуальних фінансових помічників.

Наукова новизна. Вперше комплексно досліджено можливості інтеграції п'яти ключових технологій штучного інтелекту (машинного навчання, обробки природної мови, глибокого навчання, систем рекомендацій та комп'ютерного бачення) для створення багатофункціонального фінансового помічника. Розроблено класифікацію застосувань кожної технології відповідно до конкретних функціональних завдань фінансового помічника. Визначено основні проблеми та виклики інтеграції ШІ у фінансові платформи, зокрема необхідність забезпечення високої точності обробки великих обсягів даних, виявлення нових видів шахрайства, персоналізації послуг та відповідності нормативним вимогам. Сформульовано п'ять ключових напрямків для подальших досліджень, що визначають перспективи розвитку інтелектуальних фінансових систем.

Висновки. Інтеграція технологій штучного інтелекту у фінансові платформи забезпечує автоматизацію процесів, покращення точності аналізу даних, персоналізацію рекомендацій та підвищення безпеки фінансових транзакцій. Машинне навчання дозволяє прогнозувати фінансові результати, аналізувати платіжну поведінку та виявляти аномалії в реальному часі. Обробка природної мови забезпечує автоматизацію створення персоналізованих звітів, розробку інтелектуальних чат-ботів та аналіз ринкових настроїв. Глибоке навчання оптимізує побудову точних прогностичних моделей та інвестиційних портфелів. Системи рекомендацій надають персоналізовані поради щодо управління фінансами. Комп'ютерне бачення автоматизує введення даних з фінансових документів. Впровадження цих технологій сприяє ефективному управлінню фінансами, зниженню ризиків та досягненню довгострокових фінансових цілей користувачів.

Ключові слова: штучний інтелект, фінансовий помічник, машинне навчання, обробка природної мови, глибоке навчання, системи рекомендацій, комп'ютерне бачення, прогнозування фінансових результатів, персоналізація фінансових послуг, аналіз фінансових даних.

Tetiana VAKALIUK, Dmytro ANTONIUK, Serhii DUNIEV, Oleh TALAYER, Illia DOVGALIUK. POSSIBILITIES OF APPLYING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES FOR DEVELOPING A FINANCIAL ASSISTANT

Abstract. Purpose of the work. To explore the possibilities of applying artificial intelligence technologies (machine learning, natural language processing, deep learning, recommendation systems, and computer vision) to create an effective financial assistant capable of analysing user data, forecasting financial indicators, detecting anomalies in transactions, providing personalised recommendations for budget optimisation, and automating financial planning processes.

Methodology. The article systematically analyses the current state of development of financial platforms and artificial intelligence technologies. A comparative study of the capabilities of various AI technologies for integration into financial systems was conducted. Financial platforms were classified according to their functional purpose. An analysis of practical examples of the application of artificial intelligence in the financial sector was performed based on scientific publications and industry research. Information synthesis methods identify key directions for developing intelligent financial assistants.

Scientific novelty. For the first time, the possibilities of integrating five key artificial intelligence technologies (machine learning, natural language processing, deep learning, recommendation systems, and computer vision) for creating a multifunctional financial assistant have been comprehensively investigated. The specific functional tasks of a financial assistant have developed a classification of applications for each technology. The main problems and challenges of integrating AI into financial platforms have been identified, particularly the need to ensure high accuracy in processing large volumes of data, detecting new types of fraud, personalising services and complying with regulatory requirements. Five key areas for further research have been identified, determining the prospects for developing intelligent financial systems.

Conclusions. Integrating artificial intelligence technologies into financial platforms provides process automation, improved data analysis accuracy, personalised recommendations and increased security of financial transactions. Machine learning enables the prediction of financial results, the analysis of payment behaviour, and the detection of anomalies in real-time. Natural language processing automates the creation of personalised reports, the development of intelligent chatbots and the analysis of market sentiment. Deep learning optimises the construction of accurate predictive models and investment portfolios. Recommendation systems provide personalised advice on financial management. Computer vision automates data entry from financial documents. Implementing these technologies contributes to effective financial management, risk reduction, and achieving users' long-term financial goals.

Key words: artificial intelligence, financial assistant, machine learning, natural language processing, deep learning, recommendation systems, computer vision, financial forecasting, personalisation of financial services, financial data analysis.

Постановка проблеми. Сучасний світ фінансів переживає стрімкий розвиток завдяки інтеграції штучного інтелекту в різні аспекти управління доходами та витратами. Ці технології допомагають користувачам аналізувати фінансові дані, прогнозувати тенденції та отримувати персоналізовані поради для оптимізації бюджету. Автоматизовані фінансові помічники стали невід'ємною частиною життя багатьох людей, спрощуючи процеси фінансового планування та сприяючи прийняттю обґрунтованих рішень.

Такі технології, як машинне навчання, обробка природної мови, глибоке навчання, системи рекомендацій, а також комп'ютерне бачення, суттєво змінюють підходи до управління фінансовими операціями, прогнозування ринкових трендів і покращення взаємодії з користувачами. Проте впровадження ШІ у фінансовій сфері пов'язане з численними викликами, які вимагають детального аналізу та оптимізації.

Штучний інтелект здатний обробляти великі обсяги даних, виявляти приховані закономірності та забезпечувати користувачів рекомендаціями щодо ефективного управління фінансами [1, 2]. Наприклад, аналіз доходів і витрат, автоматичне визначення перевитрат або формування заощаджень – це лише частина можливостей, які роблять такі системи важливими інструментами сучасного управління фінансами. Водночас розробка цих інструментів вимагає врахування аспектів конфіденційності, точності обчислень та персоналізації рекомендацій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз наукових джерел свідчить про зростаючий інтерес до інтеграції штучного інтелекту у фінансовий сектор. Ключові технології, такі як машинне навчання, обробка природної мови, глибоке навчання та комп'ютерне бачення, стали об'єктом численних досліджень, що відображено у працях [9, 10, 5, 8]. Фундаментальні принципи застосування штучного інтелекту в фінансовій сфері детально розглянуто в дослідженнях [7, 4], де окреслено основні напрямки трансформації фінансових послуг під впливом цих технологій.

Практичні приклади впровадження ШІ в фінансових інституціях представлено в джерелі [1], яке розкриває 21 приклад використання штучного інтелекту в банківській справі та фінансових операціях. Регуляторні аспекти та виклики імплементації ШІ у фінансовому секторі аналізуються в роботі [3], де особлива увага приділяється нормативним обмеженням та можливостям розвитку технологій.

Перспективи використання штучного інтелекту як персонального фінансового радника досліджено в публікації [2], яка розглядає інноваційні стратегії алгоритмізації фінансового консультування. Важливі розробки в галузі рекомендаційних систем для прийняття фінансових рішень представлено в нещодавньому дослідженні Шурігіна К.А. та Зіноватної С.Л. [6], де авторами запропоновано систему рекомендацій, що базується на технологіях штучного інтелекту.

Методологічні аспекти персоналізації рекомендаційних систем детально вивчено в роботі Котлярової Ю. [11], яка пропонує аналіз методів, моделей і алгоритмів персоналізації для розробки рекомендаційних систем, що є особливо актуальним для проектування фінансових помічників із використанням ШІ.

Загалом, аналіз літератури підтверджує актуальність розробки фінансових помічників на базі штучного інтелекту та вказує на необхідність комплексного підходу, що інтегрує різні технології ШІ для створення ефективних, персоналізованих та безпечних фінансових рішень.

Формулювання мети статті. Метою статті є дослідити можливості застосування технологій штучного інтелекту (машинного навчання, обробки природної мови, глибокого навчання, систем рекомендацій та комп'ютерного бачення) для створення ефективного фінансового помічника, здатного аналізувати дані користувачів, прогнозувати фінансові показники, виявляти аномалії в транзакціях, надавати персоналізовані рекомендації щодо оптимізації бюджету та автоматизувати процеси фінансового планування.

Виклад основного матеріалу дослідження. Сучасні фінансові платформи є важливим інструментом управління особистими та корпоративними фінансами. Вони забезпечують користувачів доступом до різноманітних функцій, таких як моніторинг доходів і витрат, автоматизоване фінансове планування, інвестування та надання рекомендацій щодо оптимізації бюджету. Висока конкуренція на ринку спонукає розробників постійно вдосконалювати функціональність платформ, інтегруючи передові технології, такі як штучний інтелект і машинне навчання.

Однією з ключових переваг фінансових платформ є автоматизація процесів. Вони забезпечують можливість автоматичного обліку фінансових операцій через інтеграцію з банківськими рахунками, мобільними додатками або електронними гаманцями. Це значно спрощує процес ведення фінансових записів і знижує ризик помилок.

Ще однією важливою особливістю є персоналізація. Використовуючи дані про користувача, такі платформи адаптують свої функції до індивідуальних потреб, надаючи персоналізовані рекомендації та пропозиції. Це дозволяє користувачам отримувати більш релевантні поради, які відповідають їхнім фінансовим цілям.

Сучасні платформи активно інтегрують алгоритми штучного інтелекту. Ці алгоритми використовуються для аналізу фінансових даних, прогнозування майбутніх доходів і витрат, а також для виявлення аномалій у транзакціях. Такі можливості забезпечують користувачів додатковими інструментами для ефективного управління своїми фінансами.

Доступність даних у реальному часі є ще однією важливою перевагою фінансових платформ. Вона дозволяє користувачам отримувати актуальну інформацію про свій фінансовий стан, що сприяє швидкому і точному прийняттю рішень.

Безпека конфіденційної фінансової інформації залишається критично важливим аспектом. Більшість платформ впроваджують сучасні методи шифрування даних і багатофакторну автентифікацію, забезпечуючи високий рівень захисту для своїх користувачів.

Фінансові платформи можна розділити на кілька основних типів залежно від їхнього функціонального призначення. Системи обліку особистих фінансів орієнтовані на користувачів, які прагнуть оптимізувати свої витрати, створювати бюджети та контролювати заощадження. Корпоративні платформи використовуються компаніями для управління грошовими потоками, формування звітності та оптимізації бізнес-процесів. Інвестиційні платформи допомагають користувачам управляти портфелем активів, оцінювати ризики та приймати обґрунтовані інвестиційні рішення. Кредитні сервіси, своєю чергою, автоматизують процеси надання кредитів, розрахунку відсоткових ставок і моніторингу виконання зобов'язань.

Сучасні фінансові платформи характеризуються функціональною гнучкістю, що дозволяє адаптувати їх під різні сценарії використання. Масштабованість є ще однією важливою характеристикою, оскільки система повинна бути здатна обробляти великі обсяги даних і витримувати зростання кількості користувачів. Швидкодія забезпечує ефективну роботу в реальному часі навіть при високих навантаженнях, що є критично важливим для сучасних платформ.

Окремої уваги заслуговують аналітичні можливості фінансових платформ. Вони дозволяють здійснювати точний аналіз і прогнозування на основі історичних даних, інтегруючи сучасні алгоритми

машинного навчання. Завдяки цьому користувачі отримують ефективні інструменти для прийняття фінансових рішень і досягнення своїх цілей.

Аналізуючи сучасні фінансові платформи, можна виділити тенденцію до інтеграції штучного інтелекту як основного інструменту для підвищення точності аналізу та покращення користувацького досвіду. Алгоритми штучного інтелекту дозволяють платформам не лише обробляти великі обсяги даних, але й виявляти закономірності, які недоступні для звичайного аналізу.

Таким чином, фінансові платформи є інноваційними інструментами, які допомагають користувачам ефективніше управляти своїми фінансами, знижувати ризики та досягати довгострокових фінансових цілей. У наступних розділах буде розглянуто, як саме технології штучного інтелекту можуть бути інтегровані у фінансові платформи для аналізу доходів і витрат, а також надання персоналізованих рекомендацій.

Штучний інтелект стає невід'ємною частиною фінансової сфери, змінюючи підходи до управління капіталом, аналізу даних і прийняття рішень [7, 4]. Завдяки впровадженню ШІ сучасні фінансові платформи здатні обробляти великі обсяги даних, аналізувати транзакції, прогнозувати майбутні тенденції й автоматизувати рутинні процеси [1, 3]. Розглянемо як саме і які технології штучного інтелекту використовуються у фінансовій сфері.

Машинне навчання (Machine Learning, ML) [9] – є однією з ключових технологій, що дозволяє автоматизувати процеси у фінансовій сфері шляхом самостійного вивчення даних і побудови моделей для аналізу та прогнозування. Воно забезпечує системи здатністю адаптуватися до змін у даних без необхідності ручного програмування.

Прогнозування фінансових результатів [9], таких як доходи, витрати та інвестиційна вигода, є однією з ключових сфер застосування машинного навчання. Воно дозволяє аналізувати історичні дані та будувати моделі для передбачення майбутніх фінансових показників. Наприклад, регресійний аналіз допомагає оцінити зв'язок між різними фінансовими показниками, такими як рівень витрат і доходів. Часові ряди використовуються для прогнозування сезонних коливань, змін ринкових тенденцій чи очікуваних доходів за певний період. Моделі кластеризації, своєю чергою, дозволяють групувати клієнтів або інвестиційні об'єкти за схожими характеристиками, що сприяє точнішому прогнозуванню їхньої поведінки.

Аналіз платіжної поведінки клієнтів [9] також активно використовує машинне навчання. Моделі ML вивчають звички клієнтів, їхню платіжну поведінку та історію транзакцій для створення персоналізованих фінансових рішень. Зокрема, такі моделі допомагають визначати кредитоспроможність клієнтів на основі їхньої попередньої платіжної історії. Крім того, вони можуть пропонувати відповідні фінансові продукти залежно від індивідуальних звичок користувача, що значно підвищує ефективність фінансових послуг.

Ще однією важливою сферою застосування машинного навчання є виявлення аномалій та шахрайських операцій у реальному часі. Алгоритми ML аналізують шаблони транзакцій для виявлення потенційно підозрілих операцій. Алгоритми класифікації дозволяють визначати транзакції, які не відповідають стандартній поведінці користувача. Методи кластеризації, своєю чергою, групують подібні операції, а відхилення від цих груп можуть сигналізувати про можливе шахрайство. Це забезпечує швидке реагування на ризики та підвищує безпеку фінансових систем.

Технології обробки природної мови (Natural Language Processing, NLP) [10] надають можливість ефективно працювати з текстовими даними, що створює широкий спектр можливостей для фінансових платформ у взаємодії з користувачами, аналізі великого обсягу даних та автоматизації рутинних процесів. Завдяки NLP фінансові сервіси можуть інтегрувати чат-боти, що надають консультації в режимі реального часу, автоматизувати відповіді на запити клієнтів і розпізнавати ключові тенденції в текстових документах.

Використання NLP дозволяє автоматизувати створення персоналізованих звітів про фінансовий стан клієнтів, базуючись на їхніх даних про доходи, витрати та заощадження. Ці звіти не лише містять аналітичну інформацію, але й пропонують індивідуальні рекомендації щодо оптимізації витрат, формування заощаджень або інвестування коштів. Завдяки таким можливостям користувачі можуть отримати більш структуровану і зрозумілу інформацію про свій фінансовий стан, що сприяє ухваленню обґрунтованих рішень.

Чат-боти, створені на основі NLP, здатні автоматизувати обслуговування користувачів, забезпечуючи швидкі та зручні відповіді на їхні запити. Вони можуть допомагати клієнтам перевіряти баланс рахунку, отримувати деталі про витрати за певний період, а також пропонувати індивідуальні рекомендації щодо оптимізації бюджету. Такий підхід сприяє покращенню користувацького досвіду та підвищенню ефективності роботи фінансових платформ.

Це є однією з важливих функцій сучасних технологій. Використання методів NLP дозволяє аналізувати текстові дані з різноманітних джерел, таких як ЗМІ та соціальні мережі. Завдяки цьому можна виявляти позитивні чи негативні настрої ринку, що допомагає прогнозувати зміни цін на акції чи інші активи залежно від новинного контексту. Це забезпечує бізнесу та інвесторам важливу конкурентну перевагу в ухваленні рішень.

Глибоке навчання (Deep Learning) [5] також відіграє важливу роль у фінансовій сфері, оскільки забезпечує можливість обробки складних нелінійних зв'язків у великих наборах даних. Це робить його надзвичайно ефективним для аналізу поведінки користувачів. Наприклад, моделі DL дозволяють будувати точні профілі поведінки клієнтів, враховуючи такі аспекти, як історія витрат, звички щодо заощаджень і платіжна активність за різні періоди. Цей підхід дозволяє глибше зрозуміти потреби користувачів і пропонувати їм персоналізовані фінансові рішення.

Глибокі нейронні мережі дозволяють прогнозувати ціни активів, доходи чи витрати з високою точністю, аналізуючи тисячі змінних одночасно. Завдяки здатності виявляти складні залежності між даними, ці моделі ефективно враховують як історичні фінансові показники, так і зовнішні фактори, такі як економічні тренди, новини, поведінка користувачів чи ринкові настрої. Наприклад, глибокі нейронні мережі можуть враховувати сезонність, макроекономічні дані, динаміку ринку та навіть аналізувати соціальні медіа, щоб робити прогнози з максимальною точністю. Це робить їх незамінним інструментом для управління інвестиціями, планування бюджету та оцінки ризиків.

Технології глибокого навчання застосовуються для побудови оптимальних інвестиційних портфелів, які враховують ризики, поточні ринкові умови та довгострокові прогнози, що дозволяє підвищити ефективність управління активами та мінімізувати потенційні втрати.

Системи рекомендацій є важливим елементом персоналізації у фінансових платформах. На основі аналізу транзакцій користувачів системи можуть пропонувати варіанти зменшення витрат, наприклад, через зміну постачальника послуг або зменшення витрат на непотрібні категорії.

Системи аналізують доступні ринкові пропозиції та пропонують клієнту найвигідніші варіанти. Рекомендації базуються на фінансових цілях користувача, його ризиковому профілі та ринкових даних.

Комп'ютерне бачення (Computer Vision) [8] забезпечує автоматизацію роботи з візуальними даними у фінансовій сфері.

Автоматизація введення даних стала важливим аспектом у фінансовій сфері завдяки використанню технологій комп'ютерного бачення. Ці технології дозволяють швидко сканувати та розпізнавати текст на різних документах, таких як чеки, банківські виписки та інші фінансові документи. Це значно спрощує процес введення даних, знижує ризик помилок і економить час користувачів та компаній. Завдяки цьому фінансові платформи можуть забезпечити більш точний і ефективний облік даних, автоматично інтегруючи їх у свої системи для подальшої обробки та аналізу. Автоматичний аналіз даних мінімізує ризик людських помилок, що особливо важливо при обробці великих обсягів інформації. Окрім цього, автоматизація сприяє підвищенню точності введення даних, знижує витрати часу на рутинні завдання та забезпечує однорідність обробки інформації незалежно від її складності. Це значно пришвидшує процес інтеграції даних у систему для подальшого аналізу, дозволяючи зосередитися на прийнятті стратегічних рішень та оптимізації бізнес-процесів.

Однією з головних проблем у фінансових системах є необхідність забезпечення високої точності та швидкості обробки великих обсягів даних. Це включає в себе аналіз транзакцій, прогнозування ризиків, виявлення шахрайства та надання персоналізованих фінансових послуг. Такі задачі вимагають інтеграції складних алгоритмів штучного інтелекту, які здатні адаптуватися до змін у ринковому середовищі, працювати з неповними даними, а також враховувати вимоги щодо безпеки та конфіденційності інформації.

Особливу увагу привертає проблема виявлення шахрайства у фінансових транзакціях. Традиційні методи виявлення шахрайства часто виявляються недостатньо ефективними через динамічний характер фінансових злочинів. Наприклад, стандартні алгоритми не завжди можуть швидко адаптуватися до нових видів атак або виявляти приховані аномалії в даних. У цьому контексті технології глибокого навчання та машинного навчання можуть відігравати ключову роль у створенні систем раннього попередження про підозрілі транзакції. Крім того, фінансові платформи стикаються з викликом персоналізації послуг. Сучасний користувач очікує, що платформа буде не тільки зручною у використанні, але й зможе пропонувати індивідуальні рекомендації на основі його фінансових звичок. Наприклад, системи рекомендацій можуть аналізувати дані про витрати користувача та пропонувати способи оптимізації бюджету або вигідні варіанти інвестування. Однак реалізація таких рішень потребує високоточної обробки великих обсягів даних у реальному часі, що ускладнюється обмеженнями обчислювальних ресурсів.

Висновки. Аналіз предметної галузі фінансових платформ та технологій штучного інтелекту показав, що сучасні фінансові сервіси значно трансформуються завдяки використанню передових технологій. Фінансові платформи стали важливим інструментом для управління особистими та корпоративними фінансами, пропонуючи автоматизацію процесів, персоналізацію послуг, інтеграцію з новітніми технологіями, такими як штучний інтелект, та високий рівень безпеки даних. Особливо важливим є застосування технологій штучного інтелекту, які дозволяють покращити точність аналізу фінансових даних, прогнозувати витрати та доходи, а також виявляти аномалії та потенційне шахрайство в реальному часі. Машинне навчання, обробка природної мови та глибоке навчання забезпечують високий рівень персоналізації фінансових рішень, автоматизують обслуговування клієнтів і полегшують прийняття важливих рішень у фінансовому управлінні.

Завдяки використанню штучного інтелекту фінансові платформи не лише забезпечують високу ефективність в управлінні фінансами, але й дають користувачам змогу знижувати ризики, підвищувати точність прогнозів і досягати довгострокових фінансових цілей. Технології штучного інтелекту, зокрема машинне навчання, обробка природної мови та глибоке навчання, забезпечують нові можливості для розвитку фінансових платформ, що робить їх ще більш корисними та ефективними в умовах сучасного ринку.

Отже, впровадження штучного інтелекту у фінансову сферу відкриває нові горизонти для розвитку галузі, надаючи користувачам інструменти для більш обґрунтованого фінансового планування та прийняття рішень, що відповідають їхнім індивідуальним потребам і цілям.

Список використаних джерел:

1. 21 Examples if AI in Finance. URL: <https://builtin.com/artificial-intelligence/ai-finance-banking-applications-companies>
2. Artificial Intelligence as Personal Financial Advisor in the Future? URL: https://www.researchgate.net/publication/381277119_Artificial_Intelligence_as_Personal_Financial_Advisor_in_the_Future_A_Case_Study_Based_on_Algorithmic_Innovation_Strategies
3. Artificial Intelligence in Finance: Challenges, Opportunities and Regulatory Developments. URL: https://www.amazon.com/Artificial-Intelligence-Finance-Opportunities-Developments/dp/1803926163?utm_source=chatgpt.com
4. How Artificial Intelligence is Transforming the Financial Services Industry. URL: <https://www.deloitte.com/ng/en/services/risk-advisory/services/how-artificial-intelligence-is-transforming-the-financial-services-industry.html>
5. Introduction to Deep Learning. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/introduction-deep-learning/>.
6. Shuryhin K. A., Zinovatna S. L. Recommendation system for financial decision-making using Artificial intelligence. *Applied Aspects of Information Technology*. 2024; Vol. 7, No. 4: 348–358. DOI: 10.15276/aait.07.2024.24.
7. What is artificial intelligence (AI) in finance? URL: <https://cloud.google.com/discover/finance-ai>
8. What is computer vision? URL: <https://www.ibm.com/think/topics/computer-vision>
9. What is machine learning? Definition, Types, Tools & More. URL: <https://www.datacamp.com/blog/what-is-machine-learning>
10. What is NLP (natural language processing)? URL: <https://www.ibm.com/think/topics/natural-language-processing>
11. Yuliia Kotliarova. Analysis of methods, models and algorithms of personalization for the recommender systems development. *Scientific Journal "ScienceRise"*, Vol. 12, 2018. P. 19–29. DOI: 10.15587/2313-8416.2018.152949

УДК 004.85:004.518

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.6>**Артем ВАТУЛА**

аспірант, Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет»,

a.vatyla@e-u.edu.ua

ORCID: 0009-0001-5491-5308

ОСНОВНІ МЕТОДИ МАШИННОГО НАВЧАННЯ В СИСТЕМАХ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

Анотація. *Мета роботи* полягає у комплексному огляді та систематизації основних класів методів машинного навчання (МН), які використовуються у системах підтримки прийняття рішень (СППР). Дослідження включає детальний аналіз характерних особливостей, практичних прикладів застосування алгоритмів МН у різноманітних галузях (медицина, фінанси, логістика), а також критичне порівняння переваг і недоліків кожного методу з метою визначення оптимальних умов для їх інтеграції в СППР та підвищення ефективності прийняття рішень.

Методологія дослідження базується на комплексному аналізі наукових публікацій, присвячених використанню МН у СППР, застосуванні методів класифікації алгоритмів за типом навчання (кероване, некероване, напівкероване, навчання з підкріпленням, глибоке навчання). Для цього використано методи аналізу, синтезу, порівняльної характеристики можливостей алгоритмів, а також узагальнення результатів їх практичного застосування. У дослідженні додатково враховані фактори якості вхідних даних, на яких тренуються моделі, та потенційні етичні й технологічні обмеження інтеграції цих методів.

Наукова новизна проведеного дослідження полягає в тому, що вперше запропоновано цілісну та систематизовану оцінку використання різних категорій методів машинного навчання у СППР з поглибленим аналізом їх переваг, недоліків, сфер найбільш доцільного застосування, а також умов, що визначають ефективність їх інтеграції. Узагальнено та порівняно результати попередніх досліджень, на основі чого сформульовано комплексне бачення перспективних напрямків розвитку інтелектуальних СППР з урахуванням сучасних технологічних та етичних викликів.

Висновки дослідження підтверджують, що інтеграція методів машинного навчання суттєво підвищує якість та обґрунтованість управлінських рішень завдяки автоматизації процесу аналізу великих обсягів даних та адаптації рекомендацій на основі накопиченого досвіду. Встановлено, що вибір конкретного класу методів повинен здійснюватися відповідно до особливостей завдання, обсягу доступних розмічених даних, вимог до інтерпретованості моделі та допустимих ресурсних витрат. Подальші перспективи розвитку цієї наукової проблематики пов'язані із розробкою методологічних рекомендацій щодо оптимального вибору методів для різних типів СППР, підвищенням прозорості та інтерпретованості алгоритмів, а також створенням ефективних механізмів забезпечення їх етичності, надійності та безпечності використання у практичних задачах.

Ключові слова: машинне навчання, системи підтримки прийняття рішень, кероване навчання, некероване навчання, напівкероване навчання, навчання з підкріпленням, глибоке навчання.

Artem VATULA. MAIN METHODS OF MACHINE LEARNING IN DECISION SUPPORT SYSTEMS

Abstract. *The purpose* of this paper is a comprehensive review and systematization of the main classes of machine learning (ML) methods utilized in decision support systems (DSS). The research includes a detailed analysis of distinctive features, practical examples of ML algorithms application in various fields (medicine, finance, logistics), and a critical comparison of the advantages and disadvantages of each method to identify optimal conditions for their integration into DSS and to enhance decision-making efficiency.

The research methodology is based on a comprehensive analysis of scientific publications devoted to the use of ML in DSS, employing classification methods of algorithms according to the type of learning (supervised, unsupervised, semi-supervised, reinforcement learning, deep learning). The study utilizes methods of analysis, synthesis, comparative evaluation of algorithm capabilities, and generalization of practical implementation results. Additionally, the research considers the quality of input data used for training models and addresses potential ethical and technological constraints related to the integration of these methods.

The scientific novelty of this research lies in the first-time holistic and systematized assessment of various categories of ML methods within DSS, providing an in-depth analysis of their advantages, limitations, the most suitable areas of application, and the conditions determining their integration effectiveness. The paper generalizes and compares the outcomes of previous studies, forming a comprehensive vision of prospective directions for the development of intelligent DSS, taking into account contemporary technological and ethical challenges.

The conclusions of the research confirm that the integration of ML methods significantly enhances the quality and validity of managerial decisions by automating the analysis of large data volumes and adapting recommendations based on accumulated experience. It is established that selecting a specific class of methods should depend on the nature of the task, the volume of available labeled data, the requirements for model interpretability, and allowable resource expenditures. Further research perspectives involve developing methodological guidelines for the optimal selection of methods for various types of DSS, improving algorithm transparency and interpretability, and creating effective mechanisms to ensure their ethical use, reliability, and safety in practical applications.

Key words: machine learning, decision support systems, supervised learning, unsupervised learning, semi-supervised learning, reinforcement learning, deep learning.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Сучасний етап розвитку інформаційного суспільства характеризується стрімким зростанням обсягів даних, які необхідно опрацьовувати для ухвалення обґрунтованих управлінських рішень. У різних галузях – від медицини і фінансів до промисловості – успішність діяльності все більше залежить від спроможності ефективно аналізувати великі масиви інформації та виявляти приховані закономірності. Традиційні підходи до аналізу даних часто не витримують сучасних вимог щодо масштабів і складності інформації. Це зумовлює потребу в нових, автоматизованих інструментах підтримки прийняття рішень, здатних швидко і точно обробляти інформацію, перевищуючи людські можливості за обсягом і швидкістю аналізу. Системи підтримки прийняття рішень (СППР) визначаються як інтерактивні комп'ютерні системи для підтримки різних видів діяльності під час прийняття рішень стосовно слабоструктурованих і неструктурованих проблем [1, с. 20]. Інтегрування методів штучного інтелекту, зокрема машинного навчання, трансформують такі системи на інтелектуальні СППР, які здатні автоматично покращувати свої рекомендації на основі накопичених даних і знань. Таким чином, актуальність вивчення методів машинного навчання у контексті СППР обумовлена нагальною потребою підвищення ефективності, точності й обґрунтованості управлінських рішень у складних умовах невідомості та великих даних.

Машинне навчання (МН) – це напрямок штучного інтелекту, який фокусується на розробці алгоритмів, здатних навчатися на основі даних і приймати рішення або робити прогнози без явного програмування під кожен випадок. На сьогодні існує надзвичайно багато методів і алгоритмів МН. Вибір конкретного підходу для певної задачі є нетривіальним завданням: кожен метод має свої сильні сторони, припущення і обмеження. Отже, постає важливе практичне питання – коли і який метод машинного навчання доцільно застосувати, щоб отримати найкращий результат у системі підтримки рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Протягом останніх років опубліковано значну кількість наукових робіт, присвячених застосуванню машинного навчання у системах підтримки прийняття рішень. В міру того, як МН стає все більш поширеним, етичні, соціальні та управлінські аспекти привертають все більшу увагу, визнаючи глибокий вплив цих технологій на суспільство. Таким чином, еволюція машинного навчання є результатом синергії між обчислювальним прогресом, теоретичними дослідженнями та розширенням горизонтів практичного застосування, що свідчить про настання ери, коли штучний інтелект не лише розширює людські можливості, але й змінює технологічний ландшафт [2]. Дослідники демонструють успішну інтеграцію методів МН у СППР різних галузей. Так, у медицині розроблено інтелектуальні клінічні СППР, що на основі алгоритмів машинного навчання допомагають лікарям ставити діагнози та визначати ризики захворювань. У фінансовому секторі прогностичні моделі, побудовані за допомогою МН, підвищують точність передбачення ринкових тенденцій і підтримують прийняття рішень щодо інвестицій чи управління ризиками. В сфері логістики та виробництва алгоритми МН оптимізують планування постачань, керування запасами і маршрути транспорту – тобто автоматизують складні рішення в реальному часі. Ці приклади підтверджують, що використання методів МН здатне суттєво підвищити ефективність і обґрунтованість рішень за рахунок глибшого аналізу даних, ніж це може зробити людина вручну. Разом з тим, більшість існуючих досліджень зосереджені на впровадженні окремих алгоритмів або вирішенні конкретних прикладних задач. Питання комплексного підходу залишається недостатньо висвітленим. Зокрема, дотепер не сформовано узагальнені рекомендації щодо вибору того чи іншого класу методів МН для певних умов задачі. Відсутній цілісний огляд, що порівнює різні типи навчання (кероване, некероване, напівкероване, з підкріпленням, глибоке) саме з точки зору їх ролі у системах підтримки рішень. Невирішеними частинами загальної проблеми є також питання інтерпретованості моделей МН у СППР (щоб користувач міг довіряти рекомендаціям) та забезпечення достатньої кількості якісних даних для навчання моделей. Ця стаття присвячена тим аспектам, що залишилися поза належною увагою: у ній здійснюється систематизований огляд основних категорій методів машинного навчання для СППР, порівнюються їхні можливості і обмеження, а також окреслюються підходи до вибору оптимального методу залежно від характеру задачі і даних.

Метою даної статті є узагальнення та систематизація основних методів машинного навчання, що застосовуються в системах підтримки прийняття рішень, і визначення їх ролі у підвищенні ефективності таких систем. Для досягнення цієї мети поставлено такі завдання: 1) класифікувати методи МН за категоріями навчання та описати сутність кожної категорії; 2) проаналізувати особливості та приклади застосування кожного класу методів у різних предметних областях; 3) порівняти їхні переваги і недоліки та надати рекомендації щодо вибору підходу для конкретних умов; 4) окреслити перспективи розвитку інтеграції МН у СППР.

Для досягнення поставленої мети було проведено аналітичне дослідження, результати якого викладено нижче у розрізі основних категорій методів машинного навчання. Методи дослідження полягали

у вивченні сучасної літератури з тематики МН та СППР, класифікації підходів МН за типом навчання, а також в аналізі конкретних прикладів використання цих методів. Під час аналізу особлива увага приділялася обґрунтуванню вибору методів, їх продуктивності в різних умовах і можливим обмеженням. Зокрема, розглядалися доступність і якість даних для навчання моделей, вимоги до обчислювальних ресурсів, питання інтерпретованості результатів, а також етичні аспекти (конфіденційність даних, допустимість автономного ухвалення рішень системою тощо).

Виклад основного матеріалу. В статті послідовно досліджено основні категорії методів МН – кероване, некероване, напівкероване навчання, навчання з підкріпленням та глибоке навчання – з описом їх сутності, ключових алгоритмів та ролі в системах підтримки рішень.

Кероване навчання (supervised learning) передбачає наявність навчальної вибірки даних, де для кожного прикладу задано правильний результат (цільове значення або клас). Іншими словами, алгоритм вчиться на прецедентах (історичних випадках) і будує узагальнену модель, яку потім можна застосувати для передбачення результатів на нових, раніше не бачених даних. Кероване навчання охоплює дві основні групи задач: класифікацію (присвоєння кожному об'єкту одного з наперед визначених класів) та регресію (прогнозування числового значення показника). Для реалізації таких задач розроблено багато алгоритмів МН. Основні з них включають:

- Лінійна та логістична регресія. Прості математико-статистичні моделі, що застосовуються для прогнозування кількісних показників або ймовірності належності до категорії. Наприклад, лінійна регресія може передбачати обсяг продажів на наступний період на основі витрат на рекламу, а логістична регресія – оцінювати ймовірність дефолту позичальника на підставі його фінансових показників. Регресія може використовуватись під час прогнозування обсягів продажів. В цьому випадку залежною величиною є обсяги продажів, а факторами, що на неї впливають, можуть бути попередні обсяги продажів, зміна курсу валют, активність конкурентів тощо. [5, с. 8].

- Дерева рішень. Алгоритми ухвалення рішень у вигляді дерева, де вузли відповідають умовам на значення ознак, а гілки – варіантам дії залежно від виконання цих умов. Дерева рішень послідовно розбивають простір ознак на підмножини і у кінцевих листках генерують рішення (клас або числове значення). Цей підхід застосовується як для задач класифікації, так і для регресії, забезпечуючи інтерпретовану модель ухвалення рішень (кожна гілка дерева – це правило «якщо-то»). Дерева рішень належать до найпопулярніших і потужних інструментів, що дозволяють ефективно вирішувати задачі [11, с. 117].

- Метод опорних векторів (SVM). Потужний метод класифікації та регресії, ефективний на задачах середньої розмірності даних. SVM шукає таку гіперплощину у просторі ознак, яка максимально відділяє приклади різних класів з максимальним зазором. Метод застосовується, зокрема, для розпізнавання образів чи виявлення аномалій.

- Нейронні мережі. Моделі, натхнені біологічними нейронами, які складаються з багатьох взаємопов'язаних штучних нейронів. Нейронні мережі можуть апроксимувати складні нелінійні залежності, що робить їх дуже потужними для задач класифікації та прогнозування. Наприклад, у логістиці глибокі нейронні мережі успішно застосовуються для оптимізації маршрутів транспортування або оцінки ризику збоїв у постачанні, враховуючи одразу багато факторів.

- Ансамблеві методи. Підходи, що поєднують декілька базових моделей з метою підвищення точності. Класичний приклад – алгоритм Random Forest, який будує комітет із численних дерев рішень і усереднює їх результати, знижуючи ризик перенавчання. Інший популярний підхід – Boosting (наприклад, алгоритми Gradient Boosting, XGBoost), де велика модель створюється послідовно, підбираючи наступну «слабку» модель для найгірше прогнозованих прикладів попередника. Ансамблеві методи часто демонструють вищу якість прогнозів порівняно з окремими моделями за рахунок агрегування їхніх рішень.

Керовані методи машинного навчання є найпоширенішими в практиці побудови СППР, адже велика частина управлінських задач формулюється саме як задача прогнозування або класифікації на основі історичних даних. Наприклад, моделі класифікації у медичних СППР автоматично відносять пацієнтів до груп ризику захворювання або рекомендують ймовірний діагноз на підставі наявних симптомів та результатів аналізів. Моделі регресії широко впроваджені у фінансових СППР – вони прогнозують ціни активів, обсяги продажів чи інші економічні показники, що допомагає менеджерам приймати більш обґрунтовані рішення у плануванні та інвестуванні.

Некероване навчання (unsupervised learning) працює в умовах відсутності наперед відомих правильних відповідей. Алгоритм отримує лише вхідні дані без еталонного виходу і намагається самостійно виявити внутрішні структури або закономірності. Метою некерованих методів є знайти приховану впорядкованість у даних, зрозуміти, як об'єкти можуть бути організовані чи згруповані за схожими

ознаками. Ключові завдання, що вирішуються в межах цього підходу, включають кластеризацію, пошук асоціативних правил та зниження розмірності.

Кластеризація – це групування об'єктів в однорідні групи (кластери) на основі схожості їх характеристик. При цьому наперед невідомо, скільки груп і з якими властивостями вийде – алгоритм сам шукає природну сегментацію. Кластеризація дозволяє виявити у даних структури, що не були очевидними для аналітика. У контексті СППР результати кластеризації можуть підказати нові рішення. Наприклад, маркетинговий СППР може автоматично сегментувати клієнтів на групи за схожими поведінковими патернами, що допоможе менеджерам сформувати цільові пропозиції для кожного сегмента. Застосування кластерного аналізу в контексті закупівельних процесів дозволить здійснити сегментацію поставальників та інших даних про закупівлі [7, с. 65].

Асоціативні правила – тобто пошук закономірностей типу «якщо X, то Y» у великих масивах транзакційних даних. Класичний приклад – аналіз кошика покупця в роздрібній торгівлі: алгоритми асоціативного аналізу (наприклад, Apriori) можуть виявити правила на кшталт “якщо купується товар A, то з високою ймовірністю купується і товар B”. Такі знання, інтегровані у СППР, допомагають приймати рішення щодо оптимального розміщення товарів у магазині, формування наборів продуктів чи систем рекомендацій для покупців. В ширшому сенсі, асоціативні правила застосовуються скрізь, де потрібно виявити стійкі залежності між подіями або об'єктами – наприклад, для виявлення послідовностей дій клієнта на вебсайті, що передують здійсненню покупки.

Зниження розмірності. Методи перетворення високо-вимірних даних (коли об'єкт описується дуже великою кількістю ознак) до простішого, низьковимірного представлення із збереженням основної інформативності. Відомі підходи – це метод головних компонент (PCA), сингулярний розклад, а також нейромережеві автоенкодера (autoencoders). Зниження розмірності корисне як етап попередньої обробки: воно дозволяє усунути шум, виявити ключові фактори і навіть візуалізувати складні дані на графіках. У СППР такі методи часто застосовують перед побудовою моделей прогнозування – спрощена задача з меншим числом ознак може дати більш надійний і швидкий результат. Наприклад, якщо база даних містить десятки потенційно корельованих показників, PCA допоможе сконструювати кілька узагальнених факторів, на основі яких легше будувати прогнози.

Некероване навчання відіграє допоміжну, але важливу роль у системах підтримки рішень. Його результати самі по собі не дають прямої відповіді, яке рішення правильне, але надають цінну інформацію для аналітика. Виявлені сегменти, шаблони чи залежності збагачують інформаційну базу, на основі якої вже формулюються управлінські рішення або налаштовуються інші моделі (наприклад, методи керованого навчання). Скажімо, кластерний аналіз клієнтів банку може виявити приховану групу позичальників з високим кредитним ризиком, що спонукає менеджмент розробити спеціальну стратегію роботи з цією категорією клієнтів. Таким чином, некеровані методи МН виступають інструментом пошуку нового знання, яке підвищує обґрунтованість подальших дій системи підтримки рішень.

Напівкероване навчання (semi-supervised learning) є проміжним підходом між керованим і некерованим: воно використовує невелику кількість розмічених даних разом з великою кількістю нерозмічених. Така ситуація є типовою для реальних задач, коли зібрано дуже багато інформації, але тільки для відносно небагатьох прикладів відомі правильні відповіді (розмітка виконана експертами). Отримати великі обсяги якісно розмічених даних буває дорого, довго або навіть практично неможливо, тоді як необроблені дані накопичуються постійно. Напівкеровані алгоритми дають змогу використати масив нерозмічених даних для покращення навчання на розмічених, підвищуючи точність моделі без потреби в додаткових ручних розмітках. Типовий підхід у напівкерованому навчанні полягає у двох етапах. Спочатку на всіх доступних даних (в тому числі нерозмічених) алгоритм будує певну модель структури – наприклад, виконує кластеризацію або оцінює розподіл ознак. На другому етапі ця попередня «карта» даних використовується для підсилення керованого навчання на тих прикладах, де відповіді відомі. Простими словами, модель екстраполює знання від міток на розмічених даних до схожих нерозмічених прикладів. Один із методів – self-training (самонавчання): модель спочатку навчається на невеликій вибірці з мітками, потім прогнозує мітки для частини нерозмічених даних, обирає найбільш впевнені прогнози як псевдо-мітки і донавчається з ними. Інший підхід – графові алгоритми, що моделюють всі дані як вершини графа і поширюють мітки від помічених точок до сусідніх непомічених через ребра зв'язків (алгоритми розповсюдження міток). У будь-якому разі ідея одна: задіяти структуру, приховану в нерозміченій вибірці, щоб краще класифікувати або прогнозувати небагато помічених прикладів. Напівкероване навчання знайшло застосування у ситуаціях, де повна розмітка даних є особливо складною або ресурсомісткою. У медицині, наприклад, доступні тисячі медичних зображень (рентген, МРТ тощо), але детально розмічені (з точним виділенням зон патології) – лише сотні, оскільки це потребує часу лікаря-радіолога. Напівкеровані алгоритми дозволяють навчити модель розпізнавання патологій,

використовуючи всі наявні зображення: вони виявляють структури в нерозмічених знімках і уточнюють модель на основі небагатьох розмічених. У результаті точність діагностичної моделі буде вищою, ніж при навчанні тільки на повністю розмічених даних. В бізнес-аналітиці подібний підхід корисний, коли необхідно швидко інтегрувати до СППР нові масиви даних. Замість того щоб чекати повної ручної перевірки та розмітки, систему можна частково навчити на наявних сирих даних, і вона почне видавати попередні рекомендації – поступово підвищуючи свою точність у міру появи додаткових розмічених прикладів. Отже, напівкероване навчання робить СППР більш гнучкими і адаптивними до нової інформації у випадках, коли оперативність важливіша за абсолютну точність або коли повна розмітка недоцільна.

Навчання з підкріпленням (reinforcement learning, RL) – це підхід, при якому модель (агент) навчається шляхом взаємодії зі середовищем і отримання зворотного зв'язку у вигляді винагород чи штрафів за свої дії. На відміну від керованого навчання, де агенту заздалегідь відомо, яку відповідь вважати правильною для кожного прикладу, в навчанні з підкріпленням немає наперед розміченого набору правильних рішень. Агент сам повинен спробувати різні дії і побачити їх наслідки; корисність кожної дії виражається через числову оцінку (reward). Метою агента є максимізувати сумарну винагороду у довгостроковій перспективі, тобто навчитися стратегії поведінки (послідовності дій), що приводить до найкращого результату. Навчання з підкріпленням відіграє ключову роль у вирішенні складних завдань, які вимагають адаптивності та гнучкості від алгоритмів. Наприклад, воно широко використовується в робототехніці, зокрема в системах навігації для роботів. Такі системи навчаються уникати зіткнень з перешкодами, використовуючи досвід, набутий в результаті взаємодії з середовищем і отримання зворотного зв'язку про кожне зіткнення [9, с. 196]. У завданнях керування ресурсами (наприклад, енергосистемами) RL-агенти можуть навчитися оптимально перемикаєти режими роботи обладнання залежно від навантаження, щоб мінімізувати витрати і ризики відмов. У системах підтримки рішень навчання з підкріпленням застосовується там, де потрібно автоматично виробити стратегію дій у складному динамічному середовищі. Наприклад – система керування дорожнім рухом: алгоритм з підкріпленням налаштовує режими світлофорів у реальному часі, реагуючи на зміни потоку машин, та поступово мінімізує затримки на перехрестях. Перевага навчання з підкріпленням полягає в тому, що воно здатне знаходити нестандартні, часом несподівані стратегії, які людина могла не розглянути. RL-агент діє за принципом проб і помилок і може віднайти оптимальне рішення там, де задача занадто складна для аналітичного розв'язання або де немає достатніх історичних даних для керованого навчання. Недоліком є те, що навчання потребує дуже великої кількості експериментів: агент може тисячі чи мільйони разів програти ситуацію, перш ніж навчиться діяти добре. Якщо таке навчання відбувається не на симуляції, а в реальному середовищі (наприклад, фізичний робот у виробництві), це може бути пов'язано з високими витратами або ризиками. Тому в контексті СППР навчання з підкріпленням найперспективніше там, де можна створити адекватну цифрову модель середовища і тренувати агента віртуально, або коли система сама по собі може тривалий час працювати автономно, поступово покращуючи свої рекомендації без критичних наслідків.

Глибоке навчання (deep learning) є особливим підкласом машинного навчання, який базується на використанні багатoshарових нейронних мереж. Глибоке навчання складається з декількох рівнів між вхідним і вихідним шарами, що дозволяє виконувати операції на багатьох етапах обробки нелінійної інформації з ієрархічною архітектурою, які використовуються для вивчення функцій і класифікації шаблонів [6, 10]. Завдяки такій архітектурі, глибокі нейронні мережі досягли проривних результатів у вирішенні завдань зі складною структурою вихідних даних, таких як зображення, тексти, мова, відеопотоки та часові ряди [3, с. 326]. Інтеграція глибокого навчання значно розширила можливості систем підтримки рішень, особливо в тих сферах, де раніше комп'ютерні програми поступалися експертам-людям через складність аналізу інформації. Однією з найуспішніших архітектур глибокого навчання є згорткові нейронні мережі (Convolutional Neural Networks, CNN), спеціально призначені для аналізу зображень: вони автоматично виділяють на них ключові особливості (краї, кути, текстури тощо) і на цій основі розпізнають об'єкти чи аномалії. У медицині застосування CNN дозволяє з високою точністю аналізувати рентгенівські та МРТ-знімки [4]. Інший напрям успішного застосування глибокого навчання – це обробка природної мови (Natural Language Processing, NLP). Архітектури рекурентних нейронних мереж (RNN), а особливо сучасні моделі з механізмом «уваги» (attention) та трансформери, дали змогу автоматично аналізувати і генерувати текстову інформацію. Для систем підтримки рішень це відкриває нові горизонти, адже значна частина даних представлена у вигляді текстів документів, звітів, повідомлень. Наприклад, юридична СППР може використовувати модель на базі NLP для аналізу текстів законів і судових рішень, швидко знаходячи релевантні прецеденти під конкретну справу. В управлінні знаннями (семантичному пошуку по базах даних) глибоке навчання дозволяє краще

розуміти зміст запитів і документів, видаючи більш точні результати для ухвалення рішень. Варто зазначити, що ефективне застосування глибокого навчання потребує наявності великих обсягів даних для тренування моделей. У багатьох сферах це створює виклики: дані можуть бути дорогими у зборі, або існують жорсткі обмеження на їх використання (наприклад, конфіденційність персональної інформації). Ще одна складність – інтерпретованість: глибокі нейронні мережі працюють як «чорний ящик», тож важко пояснити, чому модель зробила те чи інше передбачення, а для СППР прозорість і довіра користувача надзвичайно важливі. Тому паралельно з розвитком глибокого навчання ведуться дослідження методів пояснення рішень нейронних мереж (концепція Explainable AI) [8]. Для подолання нестачі даних усе ширше застосовуються генеративні моделі. Зокрема, генеративно-змагальні нейронні мережі (Generative Adversarial Networks, GAN) дозволяють генерувати синтетичні дані, статистично подібні до реальних. У перспективі, поєднання глибокого навчання з іншими передовими технологіями (наприклад, Інтернетом речей для збору великих даних, або хмарними обчисленнями для їх оперативної обробки) дозволить створювати ще більш ефективні інтелектуальні СППР, що в режимі реального часу аналізуватимуть ситуацію і підтримуватимуть прийняття рішень на принципово новому рівні якості.

У Таблиці 1 наведено узагальнену характеристику основних класів методів машинного навчання, що використовуються в системах підтримки прийняття рішень. Зокрема, описано переваги кожного з методів, що визначають умови їх ефективного застосування, а також зазначено основні недоліки, які необхідно враховувати при виборі оптимального підходу для конкретних задач СППР.

Таблиця 1

Переваги та недоліки основних класів методів машинного навчання

Клас методів	Переваги	Недоліки
<i>Кероване навчання</i>	висока точність моделей за умови великої розміченої вибірки; можливість оцінити якість прогнозу на тестових даних; ефективність для задач з чітко визначеними вихідними параметрами (класифікація, прогнозування).	потребує трудомісткої розмітки великих обсягів даних; ризик перенавчання за нестачі або нерепрезентативності даних; не виявляє нових знань поза межами визначених вихідних змінних.
<i>Некероване навчання</i>	дає змогу виявляти приховані закономірності та структури без еталонних відповідей; не потребує попереднього маркування даних експертами; може відкрити нові знання, неочевидні при ручному аналізі.	результати важко інтерпретувати та перевірити на правильність; немає гарантії практичної корисності виявлених шаблонів; відсутні стандартні метрики оцінки якості без еталонних даних.
<i>Напівкероване навчання</i>	зменшує потребу в великому обсязі розмічених даних, залучаючи нерозмічені; покращує точність моделей порівняно з навчанням лише на небагатьох розмічених даних; поєднує переваги керованого та некерованого підходів.	потребує хоча б невеликого набору розмічених даних для початку; ризик накопичення помилок, якщо некоректно розмічені дані додаються автоматично; складніше налаштувати й валідувати результати.
<i>Навчання з підкріпленням</i>	дає можливість навчатися оптимальної стратегії дій у динамічному середовищі; може знайти нестандартні рішення, недоступні при інших підходах; не потребує попередніх даних з відповідями, лише сигнал винагороди.	навчання потребує багатьох спроб і може бути довготривалим; висока чутливість до якості формулювання сигналу винагороди; ризик небажаної поведінки агента при неправильній винагороді або безпечності.
<i>Глибоке навчання</i>	найвищі показники точності на складних задачах (зображення, мова тощо); автоматичне виокремлення ознак з сирих даних; можливість роботи з неструктурованими даними (текст, звук).	вимога дуже великого обсягу даних для навчання; значні обчислювальні ресурси для тренування моделей; низька інтерпретованість моделей (ефект «чорної скриньки»); можливе перенавчання та упередження при обмежених або незбалансованих даних.

Висновки. У ході дослідження здійснено огляд п'яти основних категорій методів машинного навчання (керованого, некерованого, напівкерованого, з підкріпленням та глибокого навчання) у контексті їх застосування в системах підтримки прийняття рішень. Кожен з розглянутих підходів відіграє особливу роль: кероване навчання забезпечує моделі для передбачення результатів і класифікації, некероване – виявляє приховані знання у даних, напівкероване – дозволяє ефективно використовувати великі

масиви нерозмічених даних, навчання з підкріпленням – автоматизує пошук оптимальної стратегії дій, а глибоке навчання – дає змогу працювати зі складними неструктурованими даними і отримувати з них нову інформацію. Інтеграція цих методів у СППР вже продемонструвала здатність підвищувати якість рішень завдяки переходу від інтуїтивних чи евристичних підходів до доказових рекомендацій, отриманих на основі даних. Важливим висновком є те, що не існує єдиного універсального методу МН, який був би найкращим для всіх випадків. Вибір підходу має базуватися на характері задачі, доступних даних і вимогах до результату. Отже, ключова рекомендація для практиків полягає у розумінні сильних і слабких сторін кожного методу та обґрунтованому виборі інструментарію МН відповідно до специфіки поставленої проблеми. Перспективи подальших досліджень у напрямі використання машинного навчання в СППР охоплюють кілька важливих питань. По-перше, це розробка методик підвищення інтерпретованості моделей, особливо глибоких нейронних мереж, щоб рішення, які пропонує система, були прозорими і зрозумілими для людини. Це критично для таких сфер, як медицина чи фінанси, де необхідно пояснювати, чому СППР рекомендує те чи інше рішення. По-друге, актуальною є тема автоматизованого машинного навчання (AutoML) у контексті СППР – створення систем, які самостійно підбирають оптимальну модель МН під конкретну задачу, налаштовують її параметри і перевіряють якість (тобто, щоб СППР могла конструювати нові модулі штучного інтелекту з мінімальним втручанням експертів). По-третє, потребують уваги етично-правові аспекти: забезпечення конфіденційності даних, недопущення упередженості алгоритмів, вбудовування механізмів контролю людиною критично важливих рішень. Нарешті, перспективним є напрям гібридних рішень – поєднання методів машинного навчання з методами багатокритеріального аналізу, оптимізації та економіко-математичного моделювання для створення комплексних СППР, що враховують і великі дані, і експертні знання. Таким чином, основні методи машинного навчання вже зараз є невід’ємною складовою сучасних систем підтримки рішень, і їхня роль буде лише зростати. Подальші дослідження та розробки у цьому напрямку сприятимуть появі нових інтелектуальних СППР, які допомагатимуть людям приймати більш обґрунтовані, точні та ефективні рішення у різноманітних сферах діяльності.

Список використаних джерел:

1. Системи і методи підтримки прийняття рішень : підручник. П. І. Бідюк та ін. Київ : КПІ ім. І. Сікорського, 2022. 610 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/48418/1/Systemy_i_metody_pidtrymky_pryiniattia_rishen.pdf (дата звернення: 28.04.2025).
2. Bharadiya J. Machine Learning and AI in Business Intelligence: Trends and Opportunities. *International Journal of Computer (IJC)*. 2023. Vol. 48, № 1. URL: <https://www.researchgate.net/publication/371902170> (дата звернення: 28.04.2025).
3. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep learning. Cambridge : MIT Press, 2016. 775 p.
4. A guide to deep learning in healthcare. A. Esteva et al. *Nature Medicine*. 2019. Vol. 25, № 1. P. 24–29.
5. Кононова К. Ю. Машинне навчання: методи та моделі : підручник. Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2020. 280 с.
6. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning. *Nature*. 2015. Vol. 521, № 7553. P. 436–444.
7. Москаленко В. В., Кріпак С. А. Дослідження методів машинного навчання для аналізу та прогнозування закупівельних даних. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2023. № 4. С. 61–68. DOI: <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2023.4.8>.
8. Samek W. et al. Explaining deep neural networks and beyond: a review of methods and applications. *Proceedings of the IEEE*. 2021. Vol.109, № 3. P. 247–278.
9. Степовий С. М. Використання машинного навчання як інноваційного інструменту в управлінні підприємством. *Інвестиції: практика та досвід*. 2024. № 6. С. 194–200. DOI: <https://doi.org/10.32702/2306-6814.2024.6.194>.
10. Субботін С. О. Нейронні мережі: теорія та практика : навчальний посібник. Житомир : Вид. О. О. Євенок, 2020. 184 с.
11. Шаркаді М. М., Роботишин М. В., Маляр М. М. Моделі і методи машинного навчання для завдань передбачення. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія «Математика і інформатика»*. 2020. № 1(36). С. 112–122. DOI: [https://doi.org/10.24144/2616-7700.2020.1\(36\).112-122](https://doi.org/10.24144/2616-7700.2020.1(36).112-122).

УДК 004:378

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.7>**Олексій ГРАЧОВ**

магістр, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID: 0009-0003-6346-3651

PLANT MONITORING SYSTEM: ШІ-СИСТЕМА ДЛЯ РОЗУМНОГО МОНІТОРИНГУ РОСЛИН

Анотація. Сучасне сільське господарство стикається з численними викликами, такими як нестача водних ресурсів, зміни клімату та необхідність точного контролю за станом культур. Традиційні методи моніторингу часто не забезпечують достатньої точності, що може призводити до зниження врожайності та нераціонального використання ресурсів.

Мета роботи – розробка та оцінка ефективності інтелектуальної системи SmartPlant AI для автоматизованого моніторингу рослин з метою оптимізації використання ресурсів, підвищення врожайності та зменшення впливу людського фактора.

Методологія. Система SmartPlant AI поєднує IoT-пристрої, хмарні технології та алгоритми штучного інтелекту для аналізу критичних параметрів довкілля в реальному часі. Використовуються сенсори для вимірювання вологості ґрунту, температури, освітлення та складу поживних речовин. Контролери ESP8266, ESP32, Raspberry Pi та Arduino передають ці дані у хмару через Wi-Fi або LoRaWAN, застосовуючи MQTT чи HTTP API. Алгоритми машинного навчання прогнозують загрози та формують рекомендації, зокрема нейронні мережі аналізують взаємозв'язки між параметрами середовища, регресійні моделі оцінюють їхній вплив на ріст рослин, а decision trees оптимізують полив і внесення добрив.

Наукова новизна. Запропонована система забезпечує інтеграцію IoT, хмарних обчислень та штучного інтелекту для автоматизованого моніторингу стану рослин, що дозволяє підвищити точність агротехнологій. Використання алгоритмів машинного навчання у процесі обробки даних дає змогу прогнозувати загрози та адаптувати догляд за рослинами відповідно до поточних умов.

Висновки. Результати тестування на прикладі вирощування томатів показали, що система SmartPlant AI знижує споживання води на 31%, стабілізує рівень вологості ґрунту та сприяє швидшому росту рослин на 34% у порівнянні з традиційними методами. Автоматизація процесу догляду за рослинами дозволяє зменшити вплив людського фактора, підвищити ефективність аграрного виробництва та мінімізувати ризики, пов'язані з кліматичними змінами. Подальші дослідження можуть включати інтеграцію додаткових сенсорів, використання дронів та супутникових даних для ще точнішого управління сільськогосподарськими процесами.

Ключові слова: SmartPlant AI, моніторинг рослин, IoT, штучний інтелект, автоматизація сільського господарства, машинне навчання, хмарні технології.

Oleksiy HRACHOV. PLANT MONITORING SYSTEM: AI SYSTEM FOR INTELLIGENT PLANT MONITORING

Abstract. Modern agriculture faces numerous challenges, such as water scarcity, climate change, and the need for accurate crop monitoring. Traditional monitoring methods often do not provide sufficient accuracy, which can lead to reduced yields and inefficient use of resources.

The aim of the work is to develop and evaluate the effectiveness of the SmartPlant AI intelligent system for automated plant monitoring in order to optimize resource use, increase yields, and reduce the impact of the human factor.

Methodology. The SmartPlant AI system combines IoT devices, cloud technologies, and artificial intelligence algorithms to analyze critical environmental parameters in real time. Sensors are used to measure soil moisture, temperature, lighting, and nutrient composition. ESP8266, ESP32, Raspberry Pi, and Arduino controllers transmit this data to the cloud via Wi-Fi or LoRaWAN using MQTT or HTTP API. Machine learning algorithms predict threats and generate recommendations, in particular, neural networks analyze the relationships between environmental parameters, regression models assess their impact on plant growth, and decision trees optimize irrigation and fertilization.

The scientific novelty. The proposed system provides integration of IoT, cloud computing, and artificial intelligence for automated monitoring of plant health, which allows to increase the accuracy of agricultural technologies. The use of machine learning algorithms in the data processing process makes it possible to predict threats and adapt plant care to current conditions.

Conclusions. The results of testing on the example of growing tomatoes showed that the SmartPlant AI system reduces water consumption by 31%, stabilizes soil moisture levels, and promotes faster plant growth by 34% compared to traditional methods. Automation of the plant care process allows to reduce the impact of the human factor, increase the efficiency of agricultural production, and minimize the risks associated with climate change. Further research may include integrating additional sensors, using drones and satellite data for even more precise management of agricultural processes.

Key words: SmartPlant AI, plant monitoring, IoT, artificial intelligence, agricultural automation, machine learning, cloud technologies.

Вступ. Сучасне сільське господарство стикається з рядом складнощів: зміна клімату, обмеженість водних ресурсів, високі ціни на добрива та засоби захисту рослин і потреба в постійному контролі за станом культур. Традиційні методи моніторингу, зокрема, оцінка зовнішнього вигляду та систематичне

взяття проб ґрунту станом на сьогодні виявились непрацездатними та менше ефективними через низьку частоту вимірювань [8, с. 152]. Недостача своєчасної і точної інформації про стан рослин призводить до зниження урожайності, надмірного використання води та добрив, запізненого реагування на хвороби або шкідників.

З розвитком сучасних технологій Інтернету речей (IoT) та штучного інтелекту (AI) з'явилася можливість створення автономних систем моніторингу. Вони забезпечують постійний збір та аналіз даних у реальному часі [1, с. 20]. Використання різних сенсорів для вимірювання вологості ґрунту, температури, рН-рівня і вологості повітря разом з комп'ютерною обробкою даних і алгоритмами машинного навчання значно покращують точність та швидкість процесу прийняття рішень [4, с. 2].

Саме ці виклики та можливості надихнули до створення смарт-системи моніторингу рослин – інтелектуального рішення для автоматизованого контролю за рослинами. Основна мета системи полягає у наданні фермерам та власникам теплиць інструменту для виявлення проблем на початкових етапах, оптимізації використання ресурсів та покращення загальної ефективності у галузі сільського господарства.

З огляду на це основна мета дослідження полягала в розробці та оцінці ефективності системи SmartPlant AI, яка автоматизує контроль за станом рослин, забезпечує оптимальне використання ресурсів і підвищує врожайність. Для досягнення цієї мети необхідно було створити автономну систему моніторингу, що об'єднує IoT-пристрої, хмарні технології та алгоритми штучного інтелекту, розробити програмне забезпечення для обробки отриманих даних, визначити оптимальні сенсорні модулі для контролю вологості ґрунту та інших показників, а також протестувати систему у реальних умовах. У цій статті викладені ключові аспекти розробки системи, особливості її функціонування та переваги з оптимальною проекцією даних порівняно з традиційними методами моніторингу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В умовах сьогодення чимало науковців працюють над автоматизацією рутинної роботи пов'язаної з виконанням технічних робіт на підприємствах загалом та теплицях зокрема.

Так, у дослідженні М. Мохамеда та колег [3] представлено розробку та впровадження системи керування інтелектуальним електромагнітним клапаном, першого винаходу такого роду. Це рішення на основі штучного інтелекту з підтримкою 5G розроблено для моніторингу в режимі реального часу та прогнозного обслуговування електромагнітних клапанів (SOV) у промислових умовах, щоб запобігти помилковим відключенням і збоєм у роботі заводу. Ця система використовує неінтрузивні датчики для вимірювання параметрів електричного контуру котушок SOV. Ці дані передаються через модуль 5G на хмарну платформу, де передові алгоритми штучного інтелекту аналізують їх, щоб передбачити можливі збої. Система містить веб-панель для аналізу тенденцій у режимі реального часу, надаючи ранні сповіщення для проактивного обслуговування. Процес забезпечує безперервну інтеграцію та безперервний потік даних від датчиків до хмари, забезпечуючи надійні стратегії моніторингу та обслуговування [3, с. 2].

Такі дослідники як В. Куреші, Ц. Гао, О. Ельшербіні, А. Моша, М. Туніо, Дж. Куреші [6] доводять, що системи розумного землеробства з підтримкою Інтернету речей використовують датчики для безперервного моніторингу поживних речовин і виявлення газів (наприклад, NO₂, O₃, NH₃), забезпечуючи автоматизовані модифікації для підвищення аеропонічної ефективності. Ґрунтуючись на короткому огляді поточної літератури, це дослідження робить висновок, що майбутня інтеграція плазмової технології з III та Інтернетом речей може вирішити обмеження аеропоніки. Інтеграція плазмової технології з інтелектуальним туманом і системами керування на основі даних може покращити аеропонічні системи для сталого та ефективного сільськогосподарського виробництва. Це дослідження підтримує існуючу кількість досліджень, які виступають за інновації на основі плазми та інтелектуальні сільськогосподарські рішення в точному землеробстві [6, с. 3].

У роботі С. Іслама, М. Рези, С. Самсузамана, Ш. Ахмеда, Й. Чо, Д. Ноха, С.-О. Чона, С. Хона [2] було зосереджено увагу на останніх досягненнях у методах обробки зображень, розроблених для ідентифікації стресу рослин, і обговорено роль вилучення ознак, класифікації та прогнозного моделювання в досягненні надійних результатів. Було вивчено потенціал III у фізіології стресу рослин та його роль у подоланні обмежень традиційних методів, а також використання неконтрольованої ідентифікації візуальних симптомів для кількісної оцінки тяжкості стресу, що дозволяє ідентифікувати різні типи стресу рослин. Крім того, обговорювався потенціал технології машинного бачення та штучного інтелекту для моніторингу в режимі реального часу та систем підтримки прийняття рішень у точному сільському господарстві. Результати цього огляду сприяють зростанню галузі сільськогосподарських технологій, пропонуючи уявлення про розробку автоматизованих інструментів, які могли б допомогти фермерам і дослідникам у пом'якшенні впливу абіотичних стресових факторів на здоров'я та продуктивність культур / рослин [2, с. 2].

Л. Яо, Г. Ковальчук, Р. Ван де Зедде [9] представляють напрям робототехніки та екофенотипування та досліджують окремі аспекти, важливі для цієї нової області екофенотипування рослин. Зокрема, враховуючи сценарії моніторингу фенотипної інформації в різних масштабах, використана технологія інтелектуального робота, ефективна платформа автоматизації та сучасне сенсорне обладнання підсумовуються в деталях. Обговорено виклики, пов'язані з поточними дослідженнями, а також майбутні тенденції розвитку застосування технологій роботів та екофенотипування рослин. Вони включають використання зібраних даних для додатків штучного інтелекту та передачу даних із високою пропускну здатністю, а також підходи до зберігання великих добре структурованих (мета) даних у рослинництві та сільському господарстві [9, с. 4].

Дослідники С. Прабу, Р. Сентілраджа, А. Алі, С. Джаяпоорані, М. Арун [5] запропонували керовану штучним інтелектом структуру прогнозного обслуговування, яка використовує технологію Digital Twin для забезпечення моніторингу в реальному часі, діагностики несправностей і прогнозування збоїв у промислових середовищах. Фреймворк інтегрує моделі машинного навчання (ML), методи глибокого навчання та периферійні обчислення для аналізу даних датчиків, виявлення аномалій та оптимізації графіків технічного обслуговування. Для динамічного коригування стратегій технічного обслуговування, що скорочує час простою та подовжує термін служби обладнання, використовується модель прийняття рішень, заснована на навчанні. Крім того, моделі штучного інтелекту, засновані на фізиці, включені в архітектуру цифрового близнюка для імітації операційної поведінки та прогнозування потенційних збоїв з високою точністю. Запропонована система перевірена на прикладі інтелектуального виробничого підприємства, що демонструє 35% підвищення точності прогнозування, 40% скорочення незапланованих простоїв і 25% оптимізацію витрат на технічне обслуговування порівняно з традиційними підходами до прогнозованого технічного обслуговування. Отримані дані свідчать про те, що інтеграція штучного інтелекту та DTT значно підвищує надійність і ефективність кіберфізичних виробничих систем (CPMS), прокладаючи шлях для більш автономних і інтелектуальних промислових операцій [5, с. 4].

У роботі Ф. Чжана, Д. Лі, Г. Лі, Ш. Сюя [10] описано ключові технології в розробці нових передових датчиків, таких як мікронанотехнологія, технологія гнучкої електроніки та технологія мікроелектромеханічної системи. Систематично викладено останні технологічні досягнення та тенденції розвитку принципів датчиків, процесів виготовлення та параметрів продуктивності в ґрунті та різних сценаріях сегментованих культур. Нарешті, обговорюються майбутні можливості, виклики та перспективи. Очікується, що запровадження передових технологій, таких як нанотехнології та штучний інтелект, швидко й радикально змінить точність та інтелект сільськогосподарських датчиків, що призведе до нових рівнів інновацій [10, с. 2].

З опорою на здійснений аналіз можна констатувати, що питання, пов'язане з формуванням III-системи для розумного моніторингу рослин є достатньо дослідженим, проте містить декілька аспектів, які потребують подальшого наукового дослідження та опрацювання.

Метою роботи є розробка та оцінка ефективності інтелектуальної системи SmartPlant AI для автоматизованого моніторингу рослин з метою оптимізації використання ресурсів, підвищення врожайності та зменшення впливу людського фактора.

Алгоритм роботи системи. SmartPlant AI об'єднує IoT-пристрої, хмарні технології та алгоритми штучного інтелекту, щоб стежити за станом рослин у реальному часі, аналізувати зміни в середовищі та прогнозувати ризики.

Сенсори постійно вимірюють вологість ґрунту, температуру, рівень освітлення та склад поживних речовин. Контролери ESP8266, ESP32, Raspberry Pi та Arduino передають ці дані у хмару через Wi-Fi або LoRaWAN, використовуючи MQTT чи HTTP API. Завдяки цьому SmartPlant AI працює без збоїв навіть у місцях із нестабільним інтернет-з'єднанням.

Система аналізує дані у AWS, Google Cloud та Firebase, забезпечуючи швидкий доступ і надійне збереження інформації. Алгоритми машинного навчання прогнозують можливі загрози та формують точні рекомендації. Нейронні мережі визначають зв'язки між факторами довкілля, регресійні моделі оцінюють їхній вплив на ріст рослин, а decision trees підбирають оптимальний режим поливу та внесення добрив.

Користувач керує системою через мобільний або веб-додаток. Інтерфейс у реальному часі відображає всі зміни, надсилає важливі сповіщення та дає змогу контролювати автоматизовану систему поливу.

Тестування системи SmartPlant AI. Для перевірки роботи SmartPlant AI було проведено тестування на невеликій ділянці з молодими рослинами томатів. Протягом 30 днів порівнювались дані на ділянці з автоматизованим доглядом та на іншій ділянці з традиційним методом вирощування.

Для тестування було визначено саме стадію, коли рослини активно ростуть, розвивають кореневу систему та формують перші справжні листки. У цей період будь-які перепади вологості, нестача

поживних речовин або неправильний полив миттєво сповільнюють розвиток або ж сильно шкодять рослині.

SmartPlant AI підтримувала оптимальні умови, точно регулювала подачу води та контролювала рівень вологості. Завдяки такому догляду розсада отримувала стабільний догляд без ризику пересихання або надмірного зволоження.

Аналіз отриманих результатів. Дані дослідження показують очевидні результати переваги автоматизованої системи над ручним доглядом. Детальні числові дані наведені нижче.

На графіку вологості ґрунту (рис. 1) чітко видно конкретні пробої у вимірах ручного догляду. Коливання рівня вологості в межах 40–60% призводило рослини до стресу. У контрольній групі, де працювала SmartPlant AI, підтримувалась стабільна вологість 50–60%. А отже, коренева система активно росла та рівномірно розвивалась.

З ручним контролем вологості рослини отримали періодичні перепади, що врешті відобразилось на їх стані і розвитку.

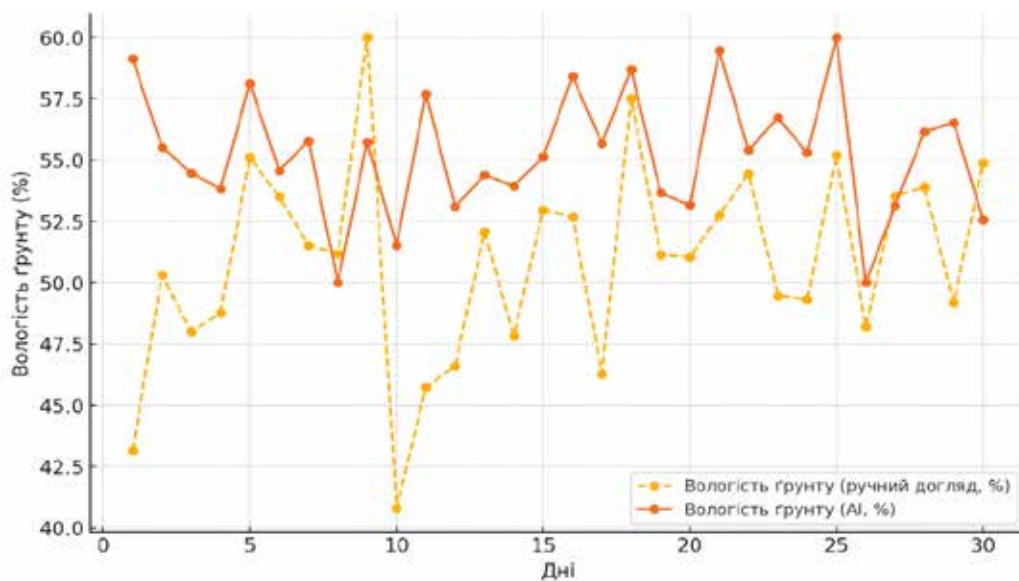


Рис. 1. Графік порівняння вологості ґрунту

На графіку витрат води (рис. 2) проілюстровано суттєву різницю у автоматизованому та ручному догляді. У традиційному догляді витрати води на одну рослину становили у середньому 3,2 л / день. SmartPlant AI оптимізувала цей показник до 2,2 л / день, зменшила таким чином загальне споживання на 31%.

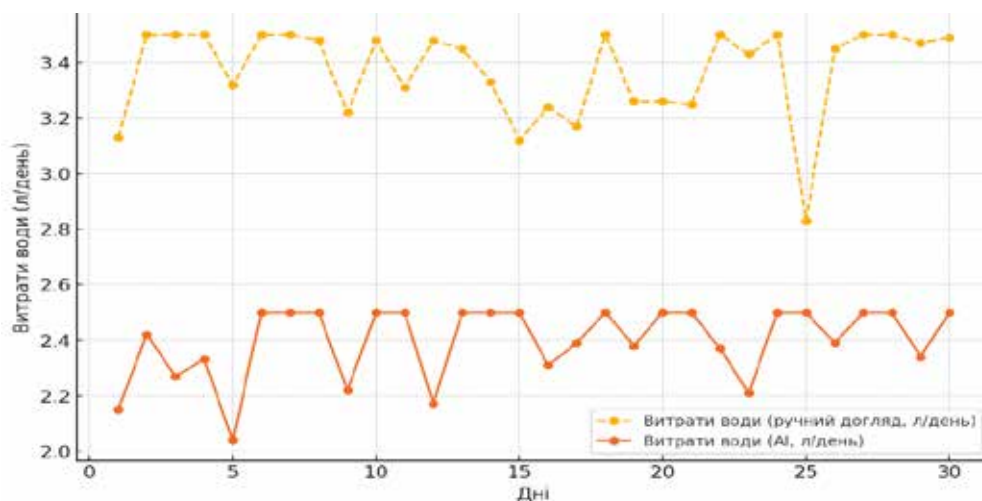


Рис. 2. Графік порівняння витрат води

Система чітко уникала надмірних витрат води та вимивання поживних речовин із ґрунту. З використанням ручного контролю рівень поливу залишався нерівномірним, і це негативно вплинуло на розвиток коренів, пригальмовуючи їхній ріст.

Графік зростання рослин (рис. 3) демонструє значний ріст томатів протягом місяця у контрольній групі з автоматизацією. У групі з ручним доглядом рослини вирости у середньому на 12,5 см.

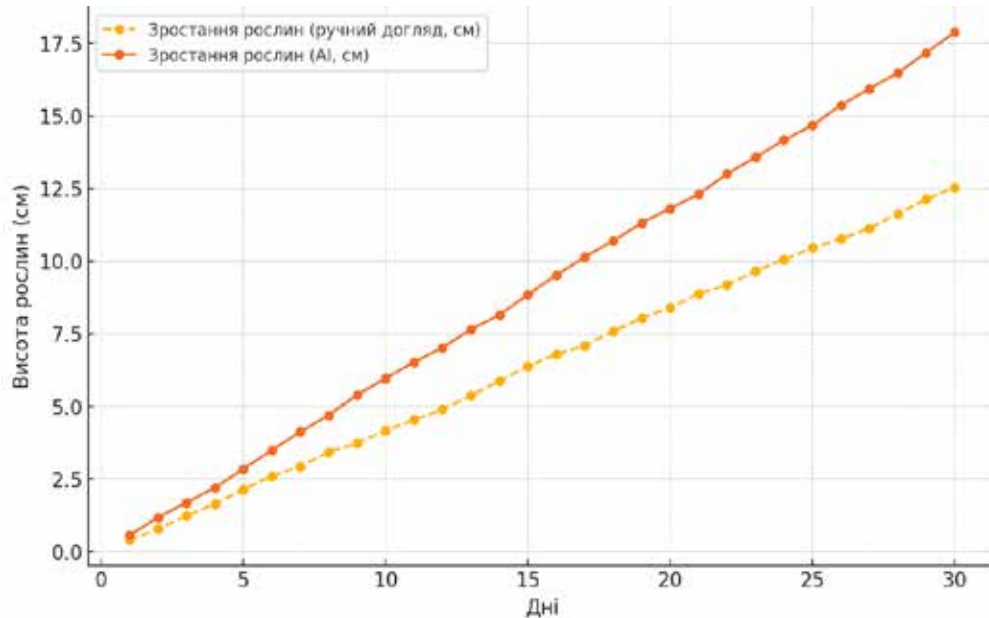


Рис. 3. Графік порівняння темпів росту томатів

Різниця у 34% між обома групами доводить ефективність автоматизації у процесі вирощування томатів. Завдяки стабільним умовам енергія рослин повністю трансформувалась у ріст без зайвих пристосувань до змін середовища.

Без автоматизації ріст розсади був менш інтенсивний, а витрати води – значно вищими. Рослини витрачали більше ресурсів на адаптацію, а нерівномірний догляд спричиняв нестабільні результати.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Результати тестування довели, що SmartPlant AI ефективно автоматизує догляд за рослинами, оптимізує споживання ресурсів і забезпечує стабільні умови для розвитку. Автоматизована система моніторингу зменшує ризик пересушування або надмірного поливу, підвищує точність прогнозування стану рослин і мінімізує залежність від людського фактора. Впровадження таких технологій у сільське господарство значно підвищить ефективність виробництва. Завдяки автоматичному контролю фермери регулюватимуть витрати води, збільшуватимуть ефективність врожаю без втрат через несприятливі умови та отримуватимуть стабільно високі показники росту. Порівнюючи SmartPlant AI з традиційними методами догляду, система забезпечує набагато точніше регулювання поливу та живлення.

Майбутні дослідження важливо зосередити на розширенні функціональності системи. Додаткові сенсори вимірювання рівня вуглекислого газу, вологості повітря та швидкості росту рослин дадуть ще точніші результати стану рослин. Інтеграція з дронами та супутниковими даними відкриває нові можливості для масштабного моніторингу. Алгоритми машинного навчання створять безпомилкове та точне прогнозування та персоналізовані рекомендації. Подальше впровадження SmartPlant AI одночасно створить сприятливі умови для розвитку екологічного фермерства, технологічного, рентабельного і незалежного від кліматичних ризиків.

Список використаних джерел:

1. Foysal F. M., Rahman M. M., Islam M. S., Hossain M. I., Hasan M. K. Scalable IoT-based smart plant monitoring and control system for sustainable agriculture. *Journal of Engineering Research and Reports*. 2025. Vol. 27. № 1. P. 16–32.
2. Islam S., Reza M. N., Samsuzzaman S., Ahmed S., Cho Y., Noh D., Chung S.-O., Hong S. Machine vision and artificial intelligence for plant growth stress detection and monitoring: A review. *Precision Agriculture Science and Technology*. 2024. Vol. 6. P. 33–57. DOI: 10.12972/pastj.20240003.

3. Mohamed M., Ghazali M., Mokhtar Z., Hashim A., Nordin M., Zulkifly M., Idris D., Ainarappan N. State-of-the-Art Intelligent Solenoid Valve Management System: AI-Driven Real-Time Monitoring and Predictive Maintenance. 2024. DOI: 10.2118/222613-MS.
4. Pavan S. S. P., Pallavi H. S. Survey on plant health monitoring system using AI. *International Journal on Science and Technology (IJSAT)*. 2025. Vol. 16. № 1. P. 1–5.
5. Prabu S., Senthilraja R., Ali A., Jayapoorani S., Arun M. AI-Driven Predictive Maintenance for Smart Manufacturing Systems Using Digital Twin Technology. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*. 2025. Vol. 11. DOI: 10.22399/ijcesen.1099.
6. Qureshi W., Gao J., Elsherbiny O., Moshia A., Tunio M., Qureshi J. Boosting Aeroponic System Development with Plasma and High-Efficiency Tools: AI and IoT-A Review. *Agronomy*. 2025. Vol. 15. № 546. DOI: 10.3390/agronomy15030546.
7. Rosell-Polo J. R., Cheein F. A., Gregorio E., Andújar D., Puigdomènech L., Masip J., Escolà A. Advances in structured light sensors applications in precision agriculture and livestock farming. *Advances in Agronomy*. 2015. Vol. 133. P. 71–112. DOI: 10.1016/bs.agron.2015.05.002.
8. Sharma K., Shivandu S. K. Integrating artificial intelligence and Internet of Things (IoT) for enhanced crop monitoring and management in precision agriculture. *Sensors International*. 2024. № 5. P. 151–158. DOI: 10.1016/j.sintl.2024.100292.
9. Yao L., Kowalchuk G. A., Van de Zedde R. Recent developments and potential of robotics in plant eco-phenotyping. *Emerging Topics in Life Sciences*. 2021. Vol. 5. DOI: 10.1042/ETLS20200275.
10. Zhang F., Li D., Li G., Xu S. New horizons in smart plant sensors: key technologies, applications, and prospects. *Frontiers in Plant Science*. 2025. Vol. 15. DOI: 10.3389/fpls.2024.1490801.

УДК 004

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.8>

Денис ДУБОВИК

кандидат технічних наук, IT expert KIVI MEDIA, denic3d@gmail.com

ORCID: 0000-0002-8983-0646

Тетяна ДУБОВИК

старший викладач кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем,
Навчально-наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет»,
Український державний університет науки і технологій,
tetyana_dubovik@udhtu.edu.ua

ORCID: 0000-0002-2359-2569

Вадим МАТУС

магістр кафедри Спеціалізованих комп'ютерних систем

Навчально-наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет»,
Український державний університет науки і технологій,
udhtu@udhtu.edu.ua

ORCID: 0009-0007-8473-2741

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ КЕРУВАННЯ МАНІПУЛЯТОРОМ З ПІДТРИМКОЮ WIFI ЗА ДОПОМОГОЮ КАМЕРИ

Анотація. Метою даної роботи є створення зручного та ефективного програмного інтерфейсу для управління маніпулятором, встановлення зв'язку з камерою для забезпечення візуального зворотного зв'язку, а також розробка модульної системи, здатної вміщати в себе різні плагіни.

Методологія. У статті розглядаються ключові особливості програмної платформи та її архітектури, акцентуючи увагу на взаємодії між маніпулятором, камерою та різними плагінами. Маніпулятор, у своїй основній функції як виконавчий механізм, оснащений затискачами для роботи та камерою над ними (використана кінематична схема, задача зворотної кінематики). Смартфон виступає сервером (підключають по Wi-Fi), відправляє команди маніпулятору. Програма на сервері має модульну структуру: в будь-який момент часу вона використовує лише один плагін, який через інтерфейс отримує дані від маніпулятора, аналізує їх та, залежно від функціональності плагіну, надає відповідні команди маніпулятору. Плата управління маніпулятором має протокол взаємодії з сервером, що дозволяє писати контролер на різних мовах програмування на боці сервера. Графічний інтерфейс програми розроблений на мові програмування Kotlin з використанням графічного фреймворку Jetpack Compose. Це дозволяє імпортувати програму на різні платформи, такі як Linux, Mac OS та Windows. Наразі програма працює лише на платформі Android.

Наукова новизна. Важливість використання вхідних даних з відеокамери в управлінні роботом, що дозволяє виконувати такі завдання, як розпізнавання об'єктів, відстеження та покращення прийняття рішень, технічні аспекти програми, включаючи протоколи обміну даними для маніпулятора та камери, архітектуру плагінів та інтерфейс користувача. Особливості модульної програмної платформи для управління маніпулятором з відеопотоком. Модульність, гнучкість і відеовхід в режимі реального часу сприяють його практичності і актуальності в сфері робототехніки.

Практичне значення. Модульна програмна платформа для управління маніпулятором з реалізацією відеопотоку на Android призначена для спрощення керування роботизованими маніпуляторами за допомогою єдиного програмного інтерфейсу та інтеграції відео в режимі реального часу для покращення контролю та прийняття рішень цієї роботи полягає в її потенційному застосуванні в різних галузях, таких як виробництво, охорона здоров'я та автоматизація. Модульний характер платформи спрощує інтеграцію конкретних функцій, роблячи її придатною для широкого спектру завдань у сфері робототехніки.

Актуальність платформи полягає в зростаючому попиті на гнучкі роботизовані системи, які можна адаптувати під різні сфери застосування. Забезпечуючи модульність і розширюваність, платформа дозволяє розробникам створювати та інтегрувати конкретні плагіни для різних завдань без необхідності перепрограмування всієї системи управління.

Висновки. Основні результати досліджень свідчать, що модульна програмна платформа успішно забезпечує єдиний інтерфейс для управління маніпулятором та інтеграції відеопотоку в режимі реального часу. Робот протестовано. Гнучкість платформи дозволяє користувачам адаптувати систему до різних завдань, що робить її цінним інструментом для дослідників і розробників у галузі робототехніки.

Ключові слова: роботизований маніпулятор, програмна платформа, відеопотік, модульність, взаємодія, автоматизація.

Denys DUBOVYK, Tetiana DUBOVYK, Vadym MATUS. DEVELOPMENT OF A SOFTWARE PLATFORM FOR CONTROLLING A WIFI-ENABLED MANIPULATOR USING A CAMERA

Abstract. The purpose of this work is to create a convenient and effective program interface for controlling the manipulator, establishing communication with the camera to provide visual feedback, as well as developing a modular system that can accommodate various plugins.

Methodology. The article discusses the key features of the software platform and its architecture, focusing on the interaction between the manipulator, camera, and various plugins. The manipulator, in its main function as an actuator, is equipped with clamps for work and a chamber above them (a kinematic scheme is used, a problem of reverse kinematics). The smartphone acts as a server (connected via Wi-Fi), sends commands to the manipulator. The program on the server has a modular structure: at any given time it uses only one plugin, which receives data from the manipulator through the interface, analyzes it and, depending on the functionality of the plugin, provides the appropriate commands to the manipulator. The program is developed in the Kotlin programming language using the Jetpack Compose graphics framework. It allows you to import the program to various platforms such as Linux, Mac OS, and Windows. Currently, the app only works on the Android platform.

Scientific novelty. The importance of using input from a video camera in robot control, allowing tasks such as object recognition, tracking and improving decision-making, technical aspects of the application, including data exchange protocols for the manipulator and camera, plugin architecture, and user interface. Features of the modular software platform for controlling a manipulator with a video stream. Modularity, flexibility and real-time video input contribute to its practicality and relevance in the field of robotics.

The practical significance of the Modular Manipulator Control Software Platform with Video Stream Implementation on Android is designed to simplify the control of robotic manipulators through a single software interface and real-time video integration to improve control and decision-making. This work lies in its potential application in various industries such as manufacturing, healthcare, and automation. The modular nature of the platform simplifies integration of specific functions, making it suitable for a wide range of tasks in the field of robotics.

The relevance of the platform lies in the growing demand for flexible robotic systems that can be adapted to different applications. By providing modularity and extensibility, the platform allows developers to create and integrate specific plugins for different tasks without having to reprogram the entire control system.

Conclusions. The main results of the research indicate that the modular software platform successfully provides a single interface for manipulator control and real-time video stream integration. The platform's flexibility allows users to adapt the system to different tasks, making it a valuable tool for researchers and developers in the field of robotics.

Key words: Robotic manipulator, software platform, video stream, modularity, interaction, automation.

Аналіз досліджень та публікацій. В роботі [1] авторами виконано комплексний аналіз прямих та обернених кінематичних розрахунків для просторового маніпулятора з новою архітектурою на шість ступенів вільності.

В роботі [4] автори зосередились на проблемі оберненої кінематики для гібридного (паралельно-серійного) маніпулятора з п'ятьма ступенями вільності (5-DOF). Проблема оберненої кінематики полягає у визначенні керуючих впливів на приводи, необхідних для виконання певної траєкторії руху в системі керування. У статті спершу надається короткий опис структури маніпулятора, яка включає в себе 3 ступені вільності для паралельної частини та 2 ступені вільності для серійної частини, і потім пояснюється алгоритм розв'язання оберненої кінематики. Запропонований алгоритм використовує формулу добутку експонент (PoE) для застосування до еквівалентного маніпулятора зі структурою серійного типу. Отриманий алгоритм надає рішення в закритій формі, не роблячи припущень щодо геометрії маніпулятора. Він був підтверджений результатами кейс-дослідження. Метод розв'язання проблеми оберненої кінематики може бути адаптований для інших гібридних маніпуляторів.

Автор [9] розглянув важливу проблему в галузі робототехніки: вирішення оберненої кінематичної задачі. Це завдання необхідне для керування робототехнічними системами і передбачає визначення керуючих дій для виконання заданої траєкторії руху. Дослідження фокусується на гібридному (паралельно-последовному) маніпуляторі з п'ятьма ступенями вільності. Основним досягненням дослідження є розробка алгоритму, який надає аналітичне рішення без будь-яких припущень щодо геометрії маніпулятора.

Виклад основного матеріалу. Розроблений маніпулятор, у своїй основній функції як виконавчий механізм, оснащений робочим органом з затисками для роботи та камерою над ними. Смартфон виступає сервером (підключають по Wi-Fi), відправляє команди маніпулятору. Останній може лише отримувати параметри серводвигунів, встановлювати кути обертання, швидкість та інші параметри. На боці сервера працює програма, яка обмінюється даними з маніпулятором по Wi-Fi і надає програмний інтерфейс для взаємодії з ним.

Програма на сервері має модульну структуру: в будь-який момент часу вона використовує лише один плагін, який через інтерфейс отримує дані від маніпулятора, аналізує їх та, залежно від функціональності плагіну, надає відповідні команди маніпулятору.

Ця модульність дозволяє виконувати різноманітні завдання за допомогою маніпулятора, не потребуючи постійного прошивання контролера плати управління маніпулятором.

Плата управління маніпулятором має протокол взаємодії з сервером, що дозволяє писати контролер на різних мовах програмування на боці сервера [9].

Графічний інтерфейс програми розроблений на мові програмування Kotlin з використанням графічного фреймворку Jetpack Compose. Це дозволяє імпортувати програму на різні платформи, такі як Linux, Mac OS та Windows. Наразі програма працює лише на платформі Android.

Програмний інтерфейс для створення плагінів.

Для забезпечення контролю передачі команд управління та даних між плагінами та маніпулятором, було створено програмний інтерфейс (API). Цей інтерфейс регулює параметри команд, які передаються від плагінів до маніпулятора, щоб уникнути випадкових значень обертів серводвигунів та інших параметрів.

Крім того, API включає у себе корисні функції, які спрощують розробку плагінів для програми, забезпечуючи можливість не переписувати різні функції, такі як пряма та зворотна кінематика. Ці функції були реалізовані один раз у межах інтерфейсу та спрощують написання плагінів.

Розробники плагінів можуть (за бажанням) використовувати виключно високорівневі функції для управління маніпулятором, такі як зсув робочого органу вліво чи вправо та інші. Крім того, API дозволяє контролювати та реєструвати різні дії плагінів, що надає більше можливостей для контролю плагінів як розробникам програм, так і розробникам плагінів. Цей інтерфейс також має методи для отримання відеопотоку з маніпулятора для подальшого аналізу та визначення поведінки маніпулятора.

Для створення власного плагіну необхідно створити папку з файлом «plugin.kt» всередині неї. У цьому файлі потрібно створити клас, який реалізує інтерфейс «Plugin». Після цього цю папку потрібно розмістити в папці «plugin» основної програми. Після цього система автоматично розпізнає цей плагін, і його можна буде використовувати.

Інтерфейс камери містить в собі протокол обміну даними між камерою та комп'ютером, та всі необхідні методи для зручного отримання зображення з камери. Схема інтерфейсу камери зображена на рисунку 1.

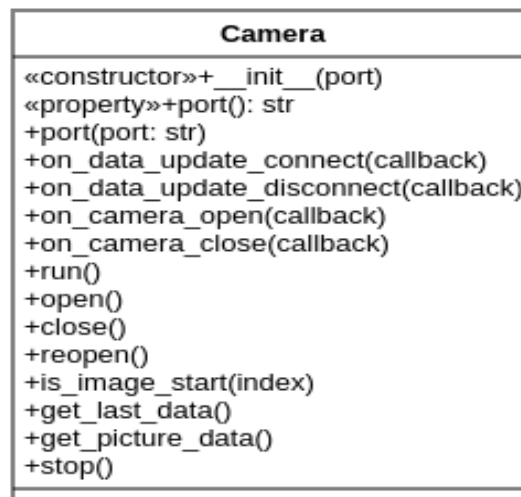


Рис. 1. Інтерфейс камери

Камера функціонує через окремий потік для уникнення блокування основного процесу при отриманні даних з послідовного порту. Крім того, використовується паттерн Singleton для обмеження створення лише одного екземпляру класу, що оптимізує отримання даних з послідовного порту.

Для отримання зображення з камери програміст повинен створити екземпляр класу та встановити порт, до якого підключена камера. Після цього можна отримати зображення за допомогою методу «get_picture_data», який поверне масив значень пікселів чорно-білого зображення. Альтернативно, можна автоматично отримувати нові зображення після їх отримання, налаштувавши метод зворотного виклику, який буде викликатися інтерфейсом камери та передавати дані нового зображення.

Створення об'єкту та налаштування правильного порту автоматизовано програмою. Відповідно, користувач може призначити потрібний порт через вікно налаштувань. Створені об'єкти інтерфейсу камери та інтерфейсу маніпулятора (про нього далі) стають доступні для плагінів через інтерфейс класу «Plugin», який має успадкувати кожен плагін.

Для сприяння зручності розробки графічної частини плагінів, також розроблено віджет камери «CameraWidget». Структура класу зображена на діаграмі, наведеній на рисунку 2

Інтерфейс маніпулятора. Як і задача інтерфейсу камери так і інтерфейсу маніпулятора, в інкапсуляції роботи протоколу обміну даними між маніпулятором та комп'ютером, та дати розробнику плагінів всі необхідні методи для управління маніпулятором.

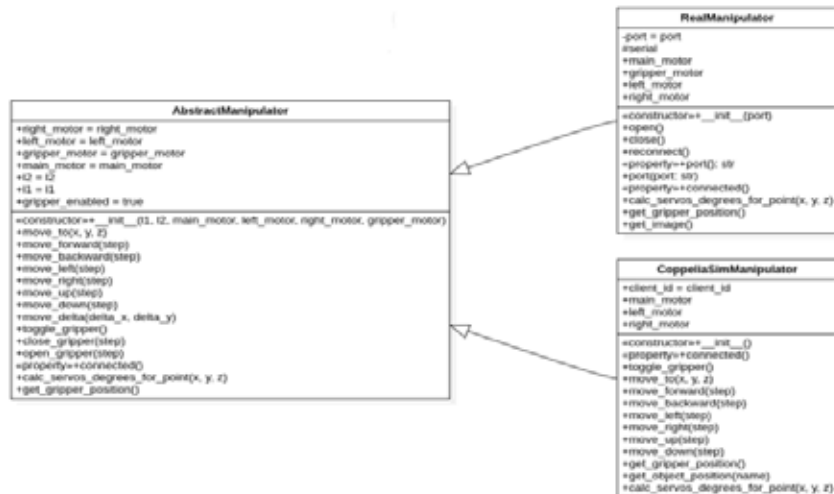


Рис. 2. Інтерфейс маніпулятора

Інтерфейс фізичного маніпулятора реалізує «RealManipulator», для швидкої розробки також була використана віртуальне середовище розробки, та для управління віртуальним маніпулятором був створений інтерфейс «CoppeliaSimManipulator» [2, 10].

Інтерфейс дає розробнику високо рівневі методи для управління маніпулятором, такі як, пересування захвату маніпулятора по всім осям з заданим кроком, або переміщення захвату в задану позицію на координатній площині відносно маніпулятора. Як і з інтерфейсом камери, створенням об'єкту та встановленням вірного порту займається сама система, до яких отримати доступ можливо через інтерфейс «Plugin».

Ручний контроль

Розроблені два плагіни для прикладу роботи модульної системи. Ручний контроль передбачає функціонал для ручного керування маніпулятором, такі функції як:

- 1) Поворот вліво
- 2) Поворот вправо
- 3) Переміщення захвату вперед
- 4) Переміщення захвату назад
- 5) Переміщення захвату вгору
- 6) Переміщення захвату вниз
- 7) Замикання захвату
- 8) Розмикання захвату
- 9) Покрокове замикавання захвату
- 10) Покрокове розмикання захвату

Робоча область плагіну зображена на рисунку 3.

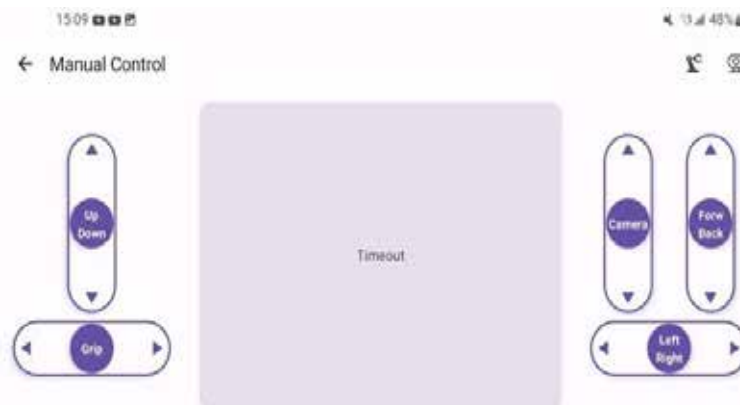


Рис. 3. Повзунки відповідають за дії маніпулятора, які на них написані

Розпізнавання обличчя. Плагін який реалізує розпізнавання обличчя з відео-потoku маніпулятора, виконує розпізнавання та автоматичне переміщення маніпулятора в залежності від напрямку обличчя (див. на рисунку 4), обличчя яке в даний момент знаходиться під трекінгом – буде завжди в центрі кадру, так як мапулятор буде переміщуватись разом з особою.

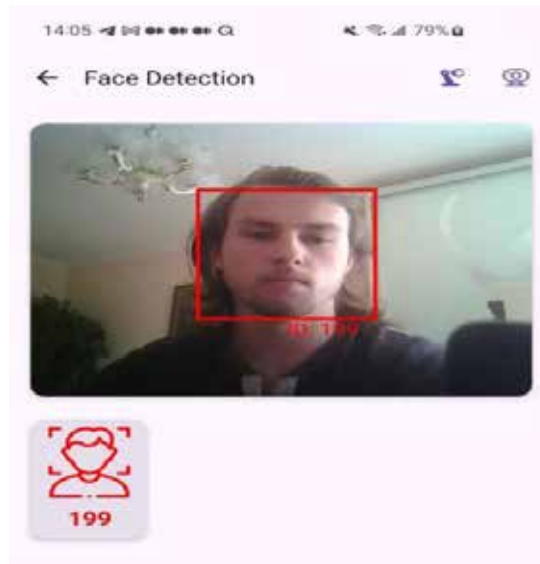


Рис. 4. Розпізнавання обличчя

Активне обличчя трекінгу підсвічується червоною рамкою, також знизу список всіх розпізнаних обличь, картики клікабельні та мають ID, після натискання на картку вона стає активною для відслідковування, якщо в кадрі буде декілька обличь, то маніпулятор буде слідувати тільки за вибраним. Приклад з декількома обличчями зображений на рисунку 5.

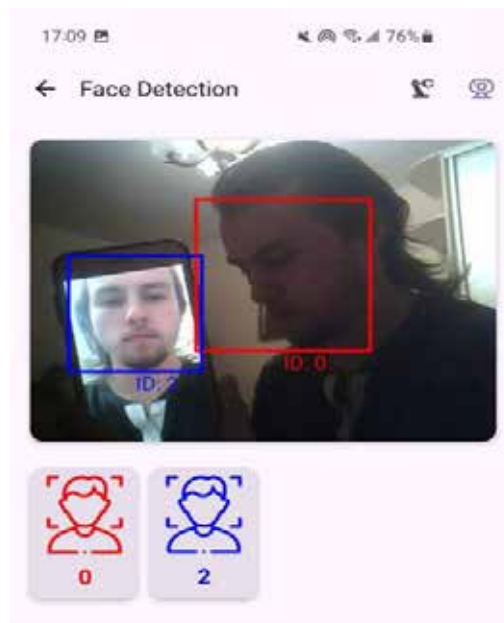


Рис. 5. Розпізнавання декількох обличь

Схеми підключення сервоприводів до шилду плати управління зображена на рисунку 6 та підключення ESP32-CAM до Arduino Uno [6,8] на рисунку 7.

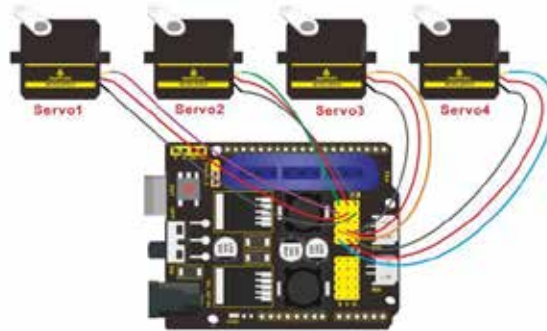


Рис. 6. Схема підключення сервоприводів до шилду плати управління

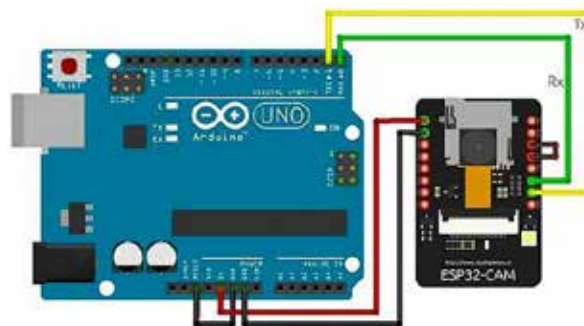


Рис. 7. Схема підключення ESP32-CAM до Arduino Uno

Підключення до маніпулятора відбувається через WiFi до ESP32-CAM, яка в свою чергу передає команди по Serial порту Arduino UNO, яка керує сервоприводами [10].

Фрагмент коду програми:

Лістинг А.3 – Текст файлу «ControlViewModel.kt»

```
class ControlViewModel(
    private val manipulator: WsManipulator,
    private val camera: Camera,
) : ViewModel() {
    val manipulatorState = manipulator.connectionState
        .onEach {
            if (it is ManipulatorState.Disconnected) disconnectCamera()
        }
        .stateIn(
            scope = viewModelScope,
            started = SharingStarted.WhileSubscribed(5_000),
            initialValue = ManipulatorState.Disconnected("")
        )
    val cameraState = camera.connectionState
        .onEach {
            if (it is CameraState.Disconnected) disconnectManipulator()
        }
}
```

Результати натурних іспитів

Плагін, що реалізує розпізнавання обличчя з відео-потoku маніпулятора, виконує розпізнавання та автоматичне переміщення маніпулятора в залежності від напрямку обличчя, обличчя яке в даний момент знаходиться під трекінгом – буде завжди в центрі кадру, так як маніпулятор буде переміщуватись разом з особою. Активне обличчя трекінгу підсвічується червоною рамкою, після натискання на картку вона стає активною для відслідковування, якщо в кадрі буде декілька обличч, то маніпулятор буде

слідкувати тільки за вибраним. Тестування системи проводилось в різних умовах, якість розпізнавання обличчя зведено в табл. 1.

Таблиця 1

Якість розпізнавання обличчя

Освітлення обличчя			Швидкість руху маніпулятора з камерою			Розташування обличчя відносно камери	
Денне світло	Тінь на обличчі	Темно	Середня	Повільно	Висока	Ліворуч/праворуч або вгору/донизу	Напроти камери
100%	70%-80%	15%	60%	100 %	25%	Не розпізнано	100%

Висновки. Для розробки було розраховано пряме та зворотне завдання кінематики, та динаміки робота-маніпулятора, сформована його математична модель, внаслідок чого з'явилась можливість провести дослідження математичної моделі робота-маніпулятора. В ході розробки та дослідження Android додатку для управління WiFi-маніпулятором з камерою було розроблено:

- 1) прошивку для маніпулятора з протоколом для зв'язку з ним;
- 2) програмний інтерфейс для зв'язку з камерою та маніпулятором;
- 3) комплексні функції в складі інтерфейсу – які спрощують розробку програм управління маніпулятором;
- 5) крос-платформний та адаптивний графічний інтерфейс користувача для управління плагінами;
- 6) систему плагінів для розширення функціоналу програми;
- 7) графічний інтерфейс для управління маніпулятором та плагінами, інтерфейс адаптивний та крос-платформний, має всі необхідні функції для управління маніпулятором;
- 8) функціонуючу систему, яка може бути використана для різних галузях для різних цілей.

Систему протестовано при різних впливах на об'єкт (світло, нахил, швидкість, тощо) та визначено: правильність взаємодії робота з його підсистемами;

продуктивність робота в конкретних умовах; захищеність робота від зовнішніх впливів та його стійкість до помилок та збоїв; точність і швидкість розпізнавання об'єктів за допомогою камер; оцінка здатності робота визначати своє місцезнаходження та слідувати заданому маршруту.

В даний час розроблена система актуальна, та має перспективу на модернізацію та удосконалення. Може бути використана в різних сферах, де затребувана роботизація виробництва.

Список використаних джерел:

1. Golla P, Ramesh S., Bandyopadhyay S. (2023). URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85162178085&origin=resultslist>
2. Katupitiya, Jayantha, Bentley, Kim DrivingMotors DC &Stepper. In: Interfacingwith
3. Lu Y, Hu B., Sun T. (2009). URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-67651153037&doi=10.1017%2fS0263574708004918&partnerID=40&md5=b6b76bdc269b31c9e03b94690f538e40>
4. Nachtwey P. Build Better Machines Through Optimized Motion Control. SAE International, 2002. <https://doi.org/10.4271/2002-01-1344>
5. Quinn A.R.J., Saxby D.J., Yang F., de Sousa A.C.C., Pizzolato C. (2023). URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85151450848&doi=10.1016%2fj.jbiomech.2023.111557&partnerID=40&md5=97ebaabaec0f7bffb4f7f0422910c2>
6. Sergeyeva O. V., Robuck E. A., Pavlenko N. Y., Dubovik T. N. Applications of computer systems based on the Arduino microprocessor system in chemical laboratory. The Eurasian Union of Scientists (ESU), 2019. 12 (69 (5)), 34–38.
7. Sergeyeva O., Lisenko V., Dubovik T., Patalakha M. "Development of a Wi-Fi controlled mobile video device on the Arduino NANO basis", Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2020. Vol. 3/9 (105), 55–60. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.206558>
8. Timmis H. "Mature Arduino Engineering. Making an Alarm System Using the Arduino", Practical Arduino Engineering. Apress. 2011. 197, doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4302-3886-7_8
9. Tze Fun Chan., Keli Shi. Applied Intelligent Control of Induction Motor Drives. John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd., 2011. <https://doi.org/10.1002/9780470825587>
10. Wen K., Harton D., Laliberte T., Gosselin C. 2019. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85071484243&doi=10.1109%2fICRA.2019.8793772&partnerID=40&md5=d36896e17c6e27ad8710120530434881>

УДК 004

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.9>

Тетяна ДУБОВИК

старший викладач кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем,
Навчально-наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет»,
Український державний університет науки і технологій,
dubovyk.tatyana@gmail.com
ORCID: 0000-0002-2359-2569

Данііл ІВАНИЦЬКИЙ

магістр кафедри Спеціалізованих комп'ютерних систем,
Навчально-наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет»,
Український державний університет науки і технологій,
dag96994@gmail.com
ORCID: 0009-0001-2031-3763

Ігор ЛЕВЧУК

кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерно – інтегрованих технологій та автоматизації,
Навчально-наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет»,
Український державний університет науки і технологій,
LiL8192@gmail.com
ORCID: 0000-0002-8983-0558

Ганна ГУЗЬ

асистент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем,
Навчально-наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет»,
Український державний університет науки і технологій,
h.m.huz@ust.edu.ua
ORCID: 0009-0002-2908-8985

Олександр РОМАНЧУК

асистент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем,
Навчально-наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет»,
Український державний університет науки і технологій,
aaromanchuk1991@gmail.com
ORCID: 0000-0003-2623-350X

РОЗРОБКА НАЗЕМНОГО КЕРОВАНОВОГО ДРОНА ПІДВИЩЕНОЇ ПРОХІДНОСТІ З РАДІОКЕРУВАННЯМ

Анотація. Метою даної роботи є розробка наземного керованого дрона підвищеної прохідності з радіокеруванням, який зможе ефективно працювати на пересічній місцевості.

Методологія. Для програмування використовується спрощена версія C++, розробку можна проводити як із використанням безкоштовного середовища Arduino IDE, так і за допомогою довільного C/C++ інструментарію. Для програмування та спілкування з комп'ютером знадобиться USB-кабель, а для автономної роботи буде потрібно блок живлення на 7,5-12 В роз'єм 5.5*2.1мм.

Практичне значення – оперативна передача інформації: радіозв'язок дозволяє швидко передавати повідомлення на значні відстані, зокрема там, де інші способи комунікації можуть бути недостатньо надійними або взагалі неможливими. Завдяки використанню радіохвиль, інформація передається миттєво, що є надзвичайно важливим для роботи екстрених служб, координації операцій або надання допомоги в реальному часі. Радіозв'язок відіграє важливу роль у військових комунікаціях, забезпечуючи зв'язок між підрозділами в польових умовах, координацію операцій і передачу команд у режимі реального часу. Військові користуються спеціальними захищеними каналами зв'язку, які можуть функціонувати в умовах перешкод та спроб глушіння сигналу, що забезпечує безпеку та ефективність військових дій.

Наукова новизна: Дрон має власні системи шифрування, які застосовуються для конфіденційних комунікацій. Регулятори встановлюють зобов'язання для операторів зв'язку, які мають забезпечувати захист даних користувачів і забезпечувати їх недоторканість у своїх мережах.

Актуальність теми полягає у постійному зростанні попиту на автономні та напіваавтономні транспортні засоби, здатні виконувати завдання в складних умовах. Запропонований проект спрямований на вирішення завдань, пов'язаних із підвищенням прохідності та зручності управління наземними дронами

Висновки. Реалізовано проектування конструкції, вибір компонентів, створення електронної частини, програмного забезпечення для управління. Досягнуті результати демонструють можливість використання розробленого дрона для виконання завдань у складних погодних умовах або в польових умовах. Підвищена прохідність забезпечується завдяки продуманій конструкції шасі та потужним приводам, а зручність керування досягається завдяки

оптимізованій системі радіозв'язку. Дрон має власні системи шифрування, які застосовуються для конфіденційних комунікацій.

Ключові слова: керований дрон, Arduino Uno, драйвер двигунів, бездротовий модуль, радіокерування.

Tetiana DUBOVYK, Daniil Ivanitskiy, Ihor LEVCHUK, Hanna HUZ, Oleksandr Romanchuk. DEVELOPMENT OF A GROUND-BASED CONTROLLED OFF-ROAD DRONE WITH RADIO CONTROL

Abstract. The purpose of this work is to develop a ground-based controlled off-road drone with radio control, which can work effectively on rough terrain.

Methodology. For programming, a simplified version of C++ is used, development can be carried out both using the free Arduino IDE environment and using arbitrary C/C++ tools. For programming and communicating with a computer, you will need a USB cable, and for autonomous operation, you will need a 7.5-12V power supply 5.5*2.1mm connector.

Practical importance is the rapid transmission of information: radio communication allows you to quickly transmit messages over long distances, in particular where other methods of communication may not be reliable enough or even impossible. Thanks to the use of radio waves, information is transmitted instantaneously, which is extremely important for the work of emergency services, coordination of operations or the provision of assistance in real time. Radio communication plays an important role in military communications, providing communication between units in the field, coordinating operations and transmitting commands in real time. The military uses special secure communication channels that can function in conditions of interference and attempts to jam the signal, which ensures the safety and effectiveness of military operations.

Scientific novelty. The drone has its own encryption systems that are used for confidential communications. Regulators set obligations for telecom operators, which must ensure the protection of user data and ensure its inviolability in their networks.

The relevance of the topic lies in the constant growth of demand for autonomous and semi-autonomous vehicles capable of performing tasks in difficult conditions. The proposed project is aimed at solving problems related to increasing the cross-country ability and ease of control of ground drones

Conclusions. The design of the structure, the selection of components, the creation of an electronic part, control software have been implemented. The results achieved demonstrate the possibility of using the developed drone to perform tasks in difficult weather conditions or in the field. Increased cross-country ability is provided by a well-thought-out chassis design and powerful drives, and ease of control is achieved thanks to an optimized radio communication system. The drone has its own encryption systems that are used for confidential communications.

Key words: RC drone, Arduino Uno, engine driver, wireless module, radio control.

Аналіз досліджень та публікацій. Автор [6] описує машинку перевертень на радіокеруванні, що демонструє неймовірні трюки та стрибки не тільки на рівному, але й на схилах чи пісчанних барханах, болотах чи серед колючок, не боючись в буквальному сенсі «ставати на голову». Хоча швидкість при цьому менша, ніж у дрифт машинок, зате видовищність на висоті.

В роботі [7] автори представляють розбір стандарту для tactic radio. Стандарт для tactic radio є алгоритм шифрування AES із довжиною ключа 128 або 256 біт. У MOTOTRBO є модифікації з шифруванням AES-256, але вони дорожчі, тому до військ їх надходить мало.

В роботі [8] автори представляють розробку Wi-Fi-керованого відео-пристрою (машинки), що живиться від акумулятора, який підключено до модуля контролера заряду з мікро USB. Можливий час автономної роботи 5-6 год без підзарядки.

Виклад основного матеріалу. Сучасний розвиток технологій радіокерування та автоматизації значно розширює можливості застосування дронів у різних сферах діяльності. Наземні дрони, на відміну від повітряних, здатні виконувати завдання в умовах, де необхідна підвищена прохідність та стійкість до складних дорожніх умов. Це робить їх актуальними для використання у пошуково-рятувальних операціях, інспекції інфраструктури, агротехнологіях та військовій справі. Для розробки використано Arduino Uno R3 (рисунок 1) [10].



Рис. 1. Контролер Arduino Uno R3

Репліка оригінальної плати Arduino UNO В якості USB-UART перехідника застосована мікросхема CH340, що добре зарекомендувала себе, яка відрізняється хорошою стабільністю, високою швидкістю передачі даних але для якої потрібна додаткова установка драйверів. напруги для АЦП контролера та IOREF – виходом напруги живлення портів введення-виведення (для автоматичного перемикавання напруги периферії при використанні 5В та 3,3В контролерів). У всьому іншому це той самий контролер Arduino UNO на базі мікроконтролера Atmega328p з масою прикладів програм, бібліотек та опису побудови готових конструкцій [1].

Arduino – це відкрита платформа з відкритим кодом програм та бібліотек, яка дозволяє збирати всілякі електронні пристрої. Плата Arduino UNO буде цікава креативникам, дизайнерам, програмістам і всім допитливим розумам, які бажають зібрати свій пристрій або керовану конструкцію. Для цієї платформи написано безліч різних прикладних програм і бібліотек. Мабуть, не залишилося датчиків, дисплеїв і виконавчих механізмів для яких не написана Arduino бібліотека або програма, в яких вони використовуються [2, 3].

Для програмування використовується спрощена версія C++, розробку можна проводити як із використанням безкоштовного середовища Arduino IDE, так і за допомогою довільного C/C++ інструментарію. Для програмування та спілкування з комп'ютером вам знадобиться USB-кабель, а для автономної роботи буде потрібно блок живлення на 7,5-12 В роз'єм 5.5*2.1мм.

Arduino Nano V3.0 з нерозпаяними конекторами – маленька, самодостатня, роз'ємно-сумісна з макетками плата на мікроконтролері ATmega328 (рисунок 2). Вона більш-менш збігається за функціональністю з Arduino Duemilanove/Uno, але має інший форм-фактор [9].



Рис. 2. Контроллер Arduino Nano V3

Arduino Nano може бути запитана від Mini-B/Micro USB роз'єму або зовнішнього джерела живлення 6-12В (пін «Vin») або 5В стабільного зовнішнього живлення (пін «5V»). Живлення автоматично перемикається на джерело з вищою напругою.

Драйвер двигунів L298N. Популярний драйвер двигунів на базі чіпа L298 може управляти двома моторами або одним кроковим двофазним двигуном (рис. 3). Підтримує роботу з керуючим мікроконтролером із напругою рівнів 3.3В. Керуюче живлення для двигунів VMS: 5~35В, сила струму 2А на міст [4].



Рис. 3. Драйвер двигунів L298N

Перемичка «5V enable» служить для вибору джерела живлення чіпа L298: на модулі встановлений стабілізатор живлення, який обрізає вхідну напругу до +5В і подає її на чіп, але якщо вхідна напруга вище 12В стабілізатор буде сильно грітися, тому при використанні моторів з напругою вище 12В необхідно зняти перемичку «5V enable» та подати на вхід «+5V power» живлення 5В для чіпа L298.

Якщо ж живлення моторів 12В і нижче, то перемичку потрібно одягнути, а з виведення +5V power можна знімати стабілізовану напругу 5В для ваших потреб. Увага! Не можна подавати напругу на виведення «+5V power» при встановленій перемичці «5V enable». На вхід «12V power» можна подавати напругу від 5 до 35В [5].

Бездротовий модуль NRF24L01+PA+LNA із зовнішньою SMA антеною (рис. 4)

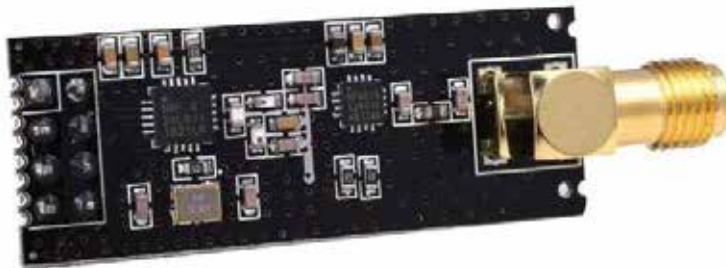


Рис. 4. Бездротовий модуль NRF24L01+PA+LNA

Бездротовий модуль NRF24L01P+ з підсилювачем та зовнішньою антеною працює на частоті, що не ліцензується, 2.4ГГц і може працювати на відстані до 1100 метрів. Кожен модуль можна програмно встановлювати як приймач чи передавач, як і можна будувати мережі типу «зірка». Модуль має невеликий розмір (45.54 x 16.46 мм), керується за протоколом SPI:

потужність передачі більше +20 дБм, 50Ω, підтримує семиканальний прийом, швидкість передачі до 2 Мбіт/сек

робоча напруга 2.7 – 3.6В, але керуючі висновки толерантні до 5В (тобто живимо до 3.6, але керуючі без проблем підключаємо до висновків Ардуїно)

мультиспектральні точки: 125 частотних точок

підтримує пересилання втрачених пакетів

робоча частота: 2400 – 2524 МГц

модуляція: GMSK

чутливість приймача: -95 дБм

максимальний струм при передачі: 115 мА

максимальний струм прийому: 45 мА

робочий діапазон температур: індустріальний стандарт -45...+85 град

посилення PA: 20 дБ

посилення LNA: 10 дБ

DC-DC знижувальний конвертер LM2596 з 4.5-40В до 3-35В [6]

Знижувальний конвертер постійного струму побудований на базі LM2596S, діапазон напруги на вході 4.5 – 40В, на виході 3 – 35В (обов'язкова умова: вхідна напруга повинна бути не менше ніж на 1.5В вище вихідного).

Джойстик для Arduino. Джойстик має 5 висновків: VCC (+5В), GND (земля), X (переміщення по осі X), Y (переміщення по осі Y) та Button (сигналізує чи натиснута кнопка) (рис. 5). На виходах X та Y сигнал диференційований, тобто змінюється від кута нахилу ручки. При використанні напруги живлення 5В за замовчуванням на аналогових висновках X і Y буде 2.5В. При переміщенні джойстика в один бік напруга наростатиме до 5В, при русі джойстика в інший бік напруга падатиме до 0В. Висновки підключаються до аналогових входів Arduino. Таким чином можна отримувати точне положення джойстика і реагувати на кут нахилу, а не тільки на сам факт нахилу ручки [5].

Завдяки ультразвуковому датчику відстані HC-SR04 – можна вимірювати відстань від 0 см до 1500 мм, точність досягає 3 мм., не має сліпих зон.



Рис. 5. Джойстик для Arduino

Nikko MegaRider 4.



Рис. 6. Фото Nikko MegaRider 4

Прошивка приймача (машинки) фрагмент коду програми:

```
#include <SPI.h>
#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>
// Піни двигунів
const int motor1Pin1 = 5; // IN1 для першого двигуна (напрямок)
const int motor1Pin2 = 6; // IN2 для першого двигуна (напрямок)
const int motor1PWM = 9; // ENA для першого двигуна (ШИМ)
const int motor2Pin1 = 4; // IN3 для другого двигуна (напрямок)
const int motor2Pin2 = 3; // IN4 для другого двигуна (напрямок)
const int motor2PWM = 10; // ENB для другого двигуна (ШИМ)
// Налаштування NRF24
RF24 radio(7, 8); // CE, CSN
const byte address[6] = "00001";
struct Command {
    int x; // Ліво/право
    int y; // Вперед/назад
};
Command command;
void setup() {
```

```

pinMode(motor1Pin1, OUTPUT);
pinMode(motor1Pin2, OUTPUT);
pinMode(motor1PWM, OUTPUT);
pinMode(motor2Pin1, OUTPUT);
pinMode(motor2Pin2, OUTPUT);
pinMode(motor2PWM, OUTPUT);
radio.begin();
radio.openReadingPipe(0, address);
radio.setPALevel(RF24_PA_MIN);
radio.startListening();
}
void loop() {
  if (radio.available()) {
    radio.read(&command, sizeof(command));
    int speedY = map(abs(command.y), 0, 512, 0, 255); // Швидкість вперед/назад
    int speedX = map(abs(command.x), 0, 512, 0, 255); // Швидкість повороту
    // Керування напрямком руху
    if (command.y > 0) {
      moveForward(speedY);
    } else if (command.y < 0) {
      moveBackward(speedY);
    } else {
      stopMotors(); // Зупинка при відсутності руху вперед-назад
    }
    // Повороти, якщо присутні значення для осі X
    if (command.x > 0) {
      turnRight(speedX);
    } else if (command.x < 0) {
      turnLeft(speedX);
    }
  }
}
void moveForward(int speed) {
  digitalWrite(motor1Pin1, HIGH);
  digitalWrite(motor1Pin2, LOW);
  analogWrite(motor1PWM, speed);
  digitalWrite(motor2Pin1, HIGH);
  digitalWrite(motor2Pin2, LOW);
  analogWrite(motor2PWM, speed);
}
void turnRight(int speed) {
  // Один двигун вперед, інший назад для повороту
  digitalWrite(motor1Pin1, HIGH);
  digitalWrite(motor1Pin2, LOW);
  analogWrite(motor1PWM, speed);
  digitalWrite(motor2Pin1, LOW);
  digitalWrite(motor2Pin2, HIGH);
  analogWrite(motor2PWM, speed);
}

```

Прошивка передавача (пульта)

```

#include <SPI.h>
#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>
// Налаштування NRF24L01
RF24 radio(7, 8); // CE, CSN пін на Nano
const byte address[6] = "00001"; // Адреса радіоканалу

```

```

struct Command {
    int x; // Вісь X (ліво-право)
    int y; // Вісь Y (вперед-назад)
};
Command command;
void setup() {
    pinMode(A0, INPUT); // Джойстик по осі X
    pinMode(A1, INPUT); // Джойстик по осі Y
    radio.begin();
    radio.openWritingPipe(address);
    radio.setPALevel(RF24_PA_MIN);
    radio.stopListening(); // Пульт буде тільки відправляти
}
void loop() {
    int xValue = analogRead(A0) - 512; // Читання осі X
    int yValue = analogRead(A1) - 512; // Читання осі Y
    // Перевірка, чи є рух вперед/назад
    if (abs(yValue) > 100) {
        command.y = yValue; // Якщо рух по осі Y значний, передати тільки Y
        command.x = 0;      // Вимкнути X
    } else {
        command.y = 0;      // Якщо рух по осі Y незначний, то зупинити Y
        command.x = xValue; // Передати X
    }
    radio.write(&command, sizeof(command)); // Відправка команди
    delay(20); // Маленька затримка для стабільної передачі
}

```

Найпопулярніший алгоритм шифрування – HALFLOOP. HALFLOOP Американський стандарт MIL-STD-188-14D, який по суті є зменшеною версією Advanced Encryption Standard (AES), диференціальний криптоаналіз може дозволити зловмиснику пропустити значні частини процесу шифрування. Розроблений наземний дрон буде захищений власним шифром, що дозволить йому робити свою справу без втручання [3,7]. Фрагмент діаграми, що впливає на цей процес представлено на рисунку 7.

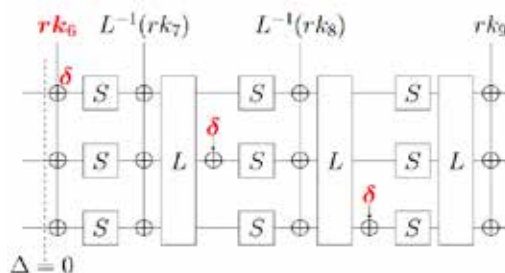


Рис. 7. Фрагмент діаграми шифрування

Тестування розробки проводились в різних «польових» умовах (рис. 8)

Слід зазначити, що машинка вдало проходить ландшафт: трава, пісок, каміння. Перешкодою стає вода вище середини колеса, велике каміння, надвисока трава (Петрів батіг, Іван-чай).

Час роботи на одному акумуляторі: 3 години.

Максимальна швидкість: 20 км/год.

Вантажопідйомність: 400 грам.

Дальність керування дроном: 500м.

Розробка відповідає вимогам та поставленим задачам.



Рис. 8. Дрон з радіокеруванням в дії

Висновки. Розроблено наземний керований дрон підвищеної прохідності з радіокеруванням. У процесі роботи проведено аналіз вимог до дронів такого типу, обрано відповідні компоненти для реалізації конструкції та електроніки, а також створено програмне забезпечення для ефективного управління пристроєм.

Досягнуті результати демонструють можливість використання розробленого дрона для виконання завдань у складних погодних умовах або в польових умовах. Підвищена прохідність забезпечується завдяки продуманій конструкції шасі та потужним приводам, а зручність керування досягається завдяки оптимізованій системі радіозв'язку.

Перспективи. Розробка має потенціал для подальшого вдосконалення, зокрема інтеграції додаткових сенсорів, автоматизації окремих процесів управління та впровадження системи зворотного зв'язку для моніторингу роботи пристрою. Отримані результати можуть стати основою для майбутніх досліджень і розробок у сфері наземних дронів.

Список використаних джерел:

1. Arduino uno. Каталог. URL: <https://arduino.ua/prod650-dc-dc-ponijyuchii-konverter-lm2596-z-4-5-40v-do-3-35v> (дата звернення 20.02.2025)
2. Kulberdiev, B. A., Dubovyk, T. M. Development of a Bluetooth-controlled machine using Arduino Uno. Materials of the xv international scientific and practical conference cutting-edge science. 2019. С. 28–29.
3. Langbridge J. A. Arduino™ Sketches: Tools and Techniques for Programming Wizardry. John Wiley & Sons Inc. 2014. <https://doi.org/10.1002/9781119183716>
4. Nebeker, Frederik. Dawn of the Electronic Age: Electrical Technologies in the Shaping of the Modern World, 1914 to 1945. John Wiley & Sons. 2009. с. 14–15. ISBN 0470409746
5. Radiostyrda bilar. URL: <https://www.tradera.com/item/342522/645372068/radiostyrd-bil-nikko-mega-rider-4> (дата звернення 20.02.2025)
6. Радіокеровані моделі. URL: <https://hobitera.com/c-radiokеровани-modeli> (дата звернення 2.03.2025)
7. Радіо для прибиральників. Зв'язок у ЗСУ – сучасний, але не військовий. Аналіз армійського досвіду. URL: https://texty.org.ua/articles/73135/radio_dla_prybyralnykiv_zvjazok_u_zsu_-73135/ (дата звернення 12.03.2025)
8. Sergeyeva O., Lisenko V., Dubovik T., Patalakha M. "Development of a Wi-Fi controlled mobile video device on the Arduino NANO basis". *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020. Vol. 3/9 (105), 55–60, DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.206558>
9. Sergeyeva O. V., Robuck E. A., Pavlenko N. Y., Dubovik T. N. Applications of computer systems based on the Arduino microprocessor system in chemical laboratory. *The Eurasian Union of Scientists* 2019. (ESU), 12 (69 (5)), 34–38.
10. Tapan K. Sarkar (ed.), ред. History of wireless (англ.). John Wiley and Sons. 2006. p. 335. ISBN 0-471-71814-9.

УДК 004.58

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.10>

Владислав ІВАНОВ

студент кафедри інженерії програмного забезпечення,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
vlad.ivanov.if@gmail.com
ORCID: 0009-0000-3788-9526

Лідія ГОБИР

асистент кафедри інженерії програмного забезпечення,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
lidagobyr@gmail.com
ORCID: 0009-0007-3176-2314

Тетяна ВАВРИК

асистент кафедри інженерії програмного забезпечення,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
vavruk1060@gmail.com
ORCID: 0000-0002-0612-0084

**ПЕРСПЕКТИВИ РЕАЛІЗАЦІЇ АВТОНОМНОГО УКРАЇНОМОВНОГО ГОЛОСОВОГО АСИСТЕНТА
НА ОСНОВІ МОВНОЇ МОДЕЛІ ТА ТЕХНОЛОГІЙ РОЗПІЗНАВАННЯ Й СИНТЕЗУ МОВЛЕННЯ**

Анотація. Метою статті є аналіз сучасних підходів та технічних можливостей реалізації повноцінного українськомовного голосового асистента для задоволення потреби в автономності, конфіденційності та можливостях його персоналізації для забезпечення гнучкості налаштування під конкретні вимоги цільових споживачів чи бізнесів. У роботі розглянуто проблеми наявних рішень на прикладі відомих хмарних платформ та підкреслено необхідність у розробці незалежних та автономних аналогів. Проведено аналіз найвідоміших доступних відкритих технологій розпізнавання мовлення, опрацювання тексту з отриманням відповіді та синтезу людино-подібного мовлення для виділення таких, що забезпечують високу якість оброблення за відносно низьких затрат ресурсів, здатні працювати з різними мовами, у тому числі українською, а також можуть бути використані для реалізації демонстраційного застосунку. Проаналізовано методики та техніки зменшення вимог до апаратного забезпечення кінцевої системи для забезпечення ефективної роботи системи в середовищах з лімітованими ресурсами. Окрема увага відводилася оптимізації виконання математичних операцій інференції моделей завдяки використанню можливостей апаратного прискорення окремих обчислювальних платформ. Окрім того, розглянуто особливості інтеграції кожного компонента в єдину систему на базі мікросервісної архітектури з можливостями адаптації цих інструментів під специфічні потреби користувачів.

Наукова новизна полягає в систематизації відомостей про технології та засоби, придатних для створення подібного роду асистентів без використання хмарних сервісів та з поєднанням різних оптимізаційних технік для розгортання подібних систем на пристроях побутового рівня. У статті обґрунтовано, що за умов поєднання компонентів з мінімальними затримками взаємодії, покращення продуктивності та якості опрацювання без значного збільшення вимог до ресурсів, а також грамотної реалізації системи, що об'єднуватиме всі компоненти, можна отримати конкурентоспроможного автономного голосового асистента, придатного до інтеграції в будь-які системи завдяки можливостям відкритої платформи.

Ключові слова: велика мовна модель, синтез мовлення, автоматичне розпізнавання мовлення, голосовий асистент.

**Vladyslav IVANOV, Lidiia HOBYR, Tetiana VAVRYK. DISCUSSING PERSPECTIVES OF DEVELOPMENT
OF AN OFFLINE UKRAINIAN-SPEAKING LLM-BASED ASSISTANT INTEGRATED WITH SPEECH SYNTHESIS
& RECOGNITION TECHNOLOGIES**

Abstract. The purpose of the article is to analyze modern approaches and technical possibilities for implementing a full-fledged Ukrainian-speaking voice assistant to meet the need for autonomy, confidentiality, personalization and to ensure the flexibility of customization to the specific requirements of target consumers. The paper considers the problems of existing solutions on examples of well-known cloud platforms and emphasizes the need to develop independent and autonomous analogs. An analysis of known open-source projects for speech recognition, text-to-speech and human-like speech synthesis was conducted to identify those that provide high quality processing at relatively low resource costs, are capable of working with different languages, including Ukrainian, and can be used to implement a demo application. Methods and techniques for reducing the hardware requirements of the end system to ensure efficient operation of the system in resource-limited environments are analyzed. Particular attention was paid to optimizing the performance of mathematical operations of model inference by using the hardware acceleration capabilities of individual computing platforms. In addition, the peculiarities of integrating each component into a single system based on a microservice architecture with the ability to adapt these tools to the specific needs of users are considered.

The scientific novelty lies in the systematization of information on technologies and tools suitable for creating such assistants without using cloud services and with a combination of various optimization techniques for deploying such systems on consumer-level devices. The article proves that if the components are combined with minimal interaction delays, performance and processing quality are improved without a significant increase in resource requirements, and the system is properly implemented to combine all components, a competitive autonomous voice assistant capable of being integrated into any system thanks to an open platform can be implemented.

Key words: large language model, speech synthesis, automatic speech recognition, voice assistant.

Вступ та постановка проблеми. Досягнення у сфері технологій штучного інтелекту в останні роки відкрили нові можливості для інтеграції різного роду асистентів у повсякденне життя. Чат-боти на основі великих мовних моделей (Large Language Model) дозволили аналізувати та опрацьовувати великі об'єми інформації, генеруючи людино-подібний текст. Незважаючи на бурхливий розвиток та повсюдне впровадження таких моделей, їх інтеграція із системами розпізнавання та синтезу мовлення досі перебуває на ранньому етапі розвитку.

Існуючі голосові асистенти переважно розроблені як клієнт-серверне програмне забезпечення із закритим вихідним кодом і функціонують на комерційних засадах. Вони мають доступ до чутливої інформації споживачів, яка постійно передається на сервери компаній та часто використовується в цілях, що не стосуються роботи самого асистента. Окрім того, вони неспроможні опрацьовувати запити, складніші за прості команди, й обмежені в персоналізації. Виникає необхідність створення платформ з широкими можливостями налаштування та здатними працювати автономно.

Метою статті є огляд сучасних рішень для створення голосових асистентів, порівняння їх ефективності та дослідження їх взаємної інтеграції на прикладі створення автономного голосового асистента на їх базі.

Завданням статті є отримання відповідей на наступні питання:

1. Способи пристосування моделей до ресурсолімітованих середовищ.
2. Які є відкриті технології для опрацювання мовлення наживо?
3. Особливості взаємної інтеграції компонентів та їх персоналізація.

Огляд існуючих рішень у сфері опрацювання мовлення. Для досягнення локального розпізнавання, опрацювання та синтезу потрібні легкі моделі й оптимізовані програмні бібліотеки, щоб зменшити затримки через виконання математичних обчислень. Моделі повинні підтримувати потокову взаємодію, щоб передавати проміжні опрацьовані дані наступній моделі в ланцюгу. У цьому розділі виконується огляд наявних рішень та порівняння ефективності використання в обмежених середовищах.

Технологія перетворення звукових даних природної мови в текст (Automatic Speech Recognition, Speech-to-Text) широко використовується у відомих голосових асистентах для створення нотаток, автоматичних субтитрів, транскрипції розмов тощо. Найвідомішим прикладом є Google Асистент, а його проблемою – необхідність доступу до інтернету через залежність від хмарної платформи Google. Серед автономних засобів розпізнавання за гнучкість у впровадженні та високу якість результатів виділяють DeepSpeech, Streaming Citrinet та ContextNet, Data2Vec та W2v-BERT 2.0, а також Whisper [10].

Streaming Citrinet – це модель для розпізнавання мовлення в реальному часі від NVIDIA, яка демонструє чудову точність та швидкість завдяки оптимізаціям для роботи на GPU з підтримкою CUDA. ContextNet також використовує CUDA та орієнтована на зменшення затримок. Її основною перевагою є ефективність у великих масштабах завдяки передбаченню контексту під час розпізнавання [8]. Ці та інші моделі вимагають відповідного програмного забезпечення, а також залежні від апаратного забезпечення NVIDIA. Mozilla DeepSpeech базується на архітектурі Baidu Deep Speech 2 і орієнтована на офлайн-розпізнавання та простоту інтеграції від Raspberry Pi 4 до потужних графічних серверів. Вона підтримує навчання на власних наборах даних, що дозволяє адаптувати модель до нових мов або акцентів. З недоліків виділяють низьку продуктивність у реальних акустичних умовах і значно вищі затримки порівняно з іншими рішеннями [3]. Meta Data2Vec – це універсальна модель, яка використовується для обробки тексту, мовлення та зображень. Для розпізнавання мовлення потребує тренування, але показує хороші результати. Недоліком є складність інтеграції для роботи наживо [14]. Схожа модель W2v-BERT 2.0 поєднує властивості моделей w2v і BERT, чим досягає високої точності в шумних умовах [15], однак є вимогливою до ресурсів. OpenAI Whisper – сучасна модель, яка вирізняється високою точністю розпізнавання мовлення різними мовами та в умовах шуму, об'єднує виявлення мовлення, транскрипцію та переклад і є гнучкою у використанні [12]. Для роботи потрібен GPU з підтримкою CUDA.

Описані технології розпізнавання мовлення здатні працювати автономно й можуть бути адаптовані під конкретні акустичні умови. З-поміж них можна виділити Streaming Citrinet та ContextNet за високу точність розпізнавання та Whisper за ефективність у співвідношенні вимог до ресурсів до якості роботи.

Великі мовні моделі в останні роки здійснили революцію у сфері контекстуальної обробки тексту. Відомі приклади – OpenAI GPT-4, Google Gemini, Anthropic Claude. Більшість платформ є закритими та не

дозволяють використання без підключення до мережі, збирають та аналізують користувацькі дані для подальшого покращення цих сервісів, а також мають обмеження на використання. Серед відкритих же платформ популярними є серії моделей загального призначення, а саме: Llama, Mistral та Gemma.

LLaMA (Large Language Model Meta AI) – серія моделей для обробки тексту з високою точністю і гнучкістю, які базуються на архітектурі трансформерів, компактні та оптимізовані для ефективного локального виконання [17]. Моделі підтримують широкий спектр мов і відомі точністю згенерованого тексту та якістю контекстного аналізу. Mistral – серія відкритих моделей, які досягають максимальної продуктивності на одиницю параметрів, а тому є менш вимогливими. Моделі є досить привабливими для дослідників, але відзначається чутливість до якості даних для тренування [7]. Gemma – модель, оптимізована для роботи на пристроях із малими обчислювальними ресурсами, базується на архітектурі трансформерів і показує високу продуктивність. Моделі серії Gemma 3 забезпечують конкурентну точність, послідовність думки в згенерованому тексті, але потребують адаптації для конкретних задач [5]. Кожен інструмент має свої переваги та недоліки, а вибір моделі залежить від вимог конкретного проєкту до точності, швидкості та ресурсоемності.

Синтез мовлення – перетворення тексту на мовний сигнал. Відомі рішення включають Google TTS та Microsoft Azure TTS, причому не всі можуть забезпечити роботу офлайн та похвалитися якістю синтезу. Проблеми цих платформ ті ж що й в аналогах для розпізнавання. Інструменти й моделі для використання офлайн, що демонструють високу якість синтезу, включають P-Flow TTS та RAD-TTS, eSpeak NG, Coqui TTS, і StyleTTS 2 [10].

NVIDIA P-Flow TTS – це модель для синтезу мовлення, яка використовує підхід потокової генерації для досягнення реалістичності синтезованого мовлення. Серед переваг висока якість звуку, підтримка багатомовності та можливість налаштування стилю [6]. RAD-TTS – інструмент, який дозволяє генерувати високоінтонаційне мовлення. Відзначається гнучкістю у стилізації мовлення та стабільністю синтезу навіть за складних буквopolучень. Як і P-Flow TTS є дуже вимогливою до апаратних ресурсів [9]. Обидві ці моделі оптимізовані для використання на графічних процесорах NVIDIA і добре інтегруються в екосистему CUDA. eSpeak NG – відкрита система синтезу, яка підтримує велику кількість мов, включаючи українську і не вимоглива до ресурсів. Якість синтезованого звуку значно поступається нейромережевим моделям, але її функціональні можливості часто утилізують інші інструменти як один із компонентів [4]. Coqui TTS – це відомий просунутий фреймворк для синтезу, який надає численні натреновані моделі та можливість створення власних. Відкритий вихідний код та підтримка спільноти, а також доволі висока якість синтезу за порівняно невеликих ресурсних затрат роблять його незамінним при використанні для вбудованих платформ [2]. Недавно представлена модель StyleTTS 2 поєднує текстову та стильову інформацію для створення реалістичного й емоційно забарвленого мовлення. Виділяється високою якістю синтезу та можливістю налаштування емоційного тону та швидкості мовлення. Вона оптимізована для роботи на GPU, що значно прискорює генерацію відповідей, але висока складність інтеграції лімітує легкість впровадження, хоча відзначають вражаючі результати синтезу [16].

Кожна з-поміж згаданих моделей має особливості налаштування й забезпечує певний рівень якості синтезу. Найкращих результатів сьогодні досягає StyleTTS 2. Вибір моделі для використання в конкретному випадку залежить від платформи розгортання й вимог до апаратного забезпечення.

Методики пристосування моделей до середовищ з лімітованими ресурсами. Для опрацювання мовлення необхідні великі обчислювальні ресурси. За допомогою різних засобів можна зменшити вимоги до системи або прискорити виконання обчислень. Одним із способів адаптації великих моделей до середовищ із обмеженими ресурсами є зменшення їх розмірів, задля чого використовуються методики обрізання, квантизація й дистиляція знань.

Обрізання моделі (pruning) передбачає видалення малозначущих шарів моделі. Метод широко застосовується у мовних моделях і моделях для обробки аудіо, наприклад, моделі Whisper доступні в різних варіантах з різною кількістю параметрів для досягнення певного компромісу між продуктивністю та розміром. Варто пам'ятати, що надто агресивне обрізання впливає на точність. Квантизація (quantization) зменшує розмір моделі, представляючи її ваги меншою розрядністю, наприклад, 8-бітною замість 32-бітної, чим значно знижує використання оперативної пам'яті, сховища та прискорює обчислення. Відомі моделі представлені в кількох варіантах з різними рівнями квантизації, а фреймворки PyTorch і TensorFlow підтримують пост-навчальну квантизацію, щоб зберегти точність. Дистиляція знань (knowledge distillation) передбачає навчання меншої «моделі-студента» на базі висновків великої «моделі-вчителя». Така техніка дозволяє передати ключові шаблони поведінки від більш складної моделі до простої, що знижує її вимоги до пам'яті та швидкості обчислень. До прикладу, моделі Gemma 3 1B та 4B були створені використовуючи попередню натреновану модель розміром 27B (B – мільярд параметрів) [5]. Такі методики значно зменшують розміри моделей, прискорюють обчислення,

але погіршують якість. Відповіді мовної моделі, квантизованої до 2-бітної розрядності, страждають від порушень логічності викладення думок. Для виконання простих команд оптимальною є модель 4- та 8-бітної розрядності *waq*, бо забезпечуються баланс між ресурсоемністю та якістю. Подальше покращення продуктивності можливе за оптимізації математичних обчислень під час інференції.

Інференція моделей у машинному навчанні – це процес використання готової моделі для здійснення прогнозів або прийняття рішень на нових даних. На цьому етапі слід розглядати інші методи прискорення обчислень, такі як спеціалізовані обчислювальні платформи, які забезпечують оптимізовану обробку математичних операцій: OpenBLAS, CUDA, ROCm та oneMKL.

OpenBLAS – відкрита бібліотека, оптимізована для лінійної алгебри, яка працює за рахунок багатоядерного центрального процесора (CPU). Вона підходить для проєктів, де GPU недоступний для зменшення енергоспоживання. Бібліотека ефективно виконує множення великих матриць, але у швидкості обробки великих масивів даних програє CUDA, яка є фреймворком для паралельних обчислень на графічних процесорах. CUDA-ядра сьогодні присутні в більшості сучасних відеокарт NVIDIA, чим забезпечується висока доступність платформи. AMD ROCm (Radeon Open Compute) – це платформа для високопродуктивних обчислень на GPU, яка підтримує паралельну обробку даних і оптимізована для роботи з архітектурами RDNA та CDNA. Платформа несумісна з операційною системою Windows, але підтримується більшістю сучасних фреймворків машинного навчання, що дозволяє використовувати її там, де вже використовується CUDA. Менш відома oneMKL оптимізована для роботи на процесорах Intel і забезпечує високу продуктивність у задачах лінійної алгебри. Вона також підтримує багатопотоковість, але її продуктивність на процесорах інших виробників значно гірша. Ідеально підходить для CPU-орієнтованих систем, однак значно програє CUDA.

Порівняння продуктивності платформ часто є недоречним, бо не всі вони є взаємозамінними. CUDA найбільш популярна завдяки широкій підтримці інструментів і високій ефективності на GPU NVIDIA. У свою чергу, ROCm надає можливість розробки на GPU AMD, забезпечує відкритий код і конкурентоспроможність, хоча менш поширений. OpenBLAS і oneMKL більше підходять для процесороцентричних завдань. У питанні продуктивності для машинного навчання лідирують CUDA та ROCm, але залежать від специфіки архітектури, а кінцевий вибір платформи визначається проєктом.

Побудова архітектури демонстраційної системи. Прототипування – це процес створення спрощеної, але функціональної моделі продукту, щоб швидко перевірити працездатність ідеї, провести тестування. У цьому розділі йтиметься про особливості реалізації демонстраційного проєкту.

Вибір технологій для створення голосового асистента значною мірою визначається особливостями взаємної інтеграції компонентів та можливостями їх налаштування під особливі варіанти використання. Основні модулі повинні працювати безперебійно, забезпечувати мінімальні затримки та високу якість взаємодії. Для цього необхідно враховувати сумісність моделей, оптимізацію обчислювальних процесів та масштабованість системи згідно вимог проєкту.

Для реалізації експериментальної частини мовою програмування обрано Python, яка є стандартом у сфері штучного інтелекту завдяки великій кількості інструментів та бібліотек. Раніше згадані Whisper, Gemma 3 і StyleTTS 2 обрано основними модулями системи, адже вони є передовими рішеннями у своїх сегментах, мають хорошу документацію та підтримку спільноти. Їх використання вимагає встановлення відповідних бібліотек згідно рекомендацій залежно від цільової платформи. Для запуску Gemma 3 знадобиться llama-cpp-python (версії не нижче 0.3.8) – бібліотека, яка забезпечує інференцію Llama-моделей. Для розпізнавання мовлення за допомогою Whisper потрібен PyTorch – інструмент для створення нейронних мереж та машинного навчання, який забезпечує автоматичне диференціювання, оптимізацію, роботу з тензорами тощо. Запуск Whisper-моделей також потребує бібліотеки whisper, для прискорення якої використовуватиметься faster_whisper, а також whisper_streaming, яка відкриває доступ до потокових функцій.

Перед встановленням llama-cpp-python, PyTorch чи faster_whisper слід виконати налаштування обраної обчислювальної платформи, щоб покращити продуктивність. У цій статті налаштування розглядається під платформу CUDA. Спочатку потрібно отримати Microsoft Visual Studio, а також завантажити інструменти збирання MSVC та Windows SDK останніх версій через Visual Studio Installer. Опісля відбувається встановлення CUDA з інтеграцією для Visual Studio для успішного збирання бібліотек. Окрім того, faster_whisper використовує реалізацію моделі-трансформера Whisper на CTranslate2, чим забезпечує майже чотирикратне прискорення обчислень. Для її роботи потрібна бібліотека примітивів для нейронних мереж NVIDIA cuDNN, яка інсталується окремо від CUDA. Для моделі StyleTTS 2 важливим моментом є встановлення бібліотеки Phonemizer для перетворення тексту в фонему: наприклад, фраза «Привіт, як справи?» перетворюється в «privit jak spravi» й буде передана моделі на синтез [1]. Такий підхід дозволяє покращити інтонацію й враховувати фонетичні особливості різних мов. Для цього

Phonemizer вимагає наявності eSpeak NG для цільової платформи, щоб виконувати кінцевий синтез мовлення [4]. Систему слід будувати на мікросервісній архітектурі, яка зменшує складність дроблячи конструкцію на окремі незалежні модулі. У цьому проєкті кожна модель буде запущена як окремий сервіс за допомогою FastAPI.

Створення ефективного голосового асистента вимагає інтеграції модулів опрацювання мовлення так, щоб затримки передавання та опрацювання були мінімальні. Для їх зменшення слід утилізувати можливості стримінгу (streaming), за якого потік даних розбивається на сегменти і вони поступають у чергу. Після опрацювання відбувається транслювання результату, а тому можна отримати перші результати ще до кінця введення вхідних даних. Хоч більшість моделей підтримують стримінг, він не завжди доцільний – наприклад, коли мовна модель приймає цілісний текстовий запит. Можна додатково впроваджувати обробку тексту та аудіо за допомогою регулярних виразів, шумопоглиначів, обробників команд, засобів доповнення контексту тощо. Загальну схему взаємодії компонентів представлено за допомогою UML-діаграми на рис. 1.

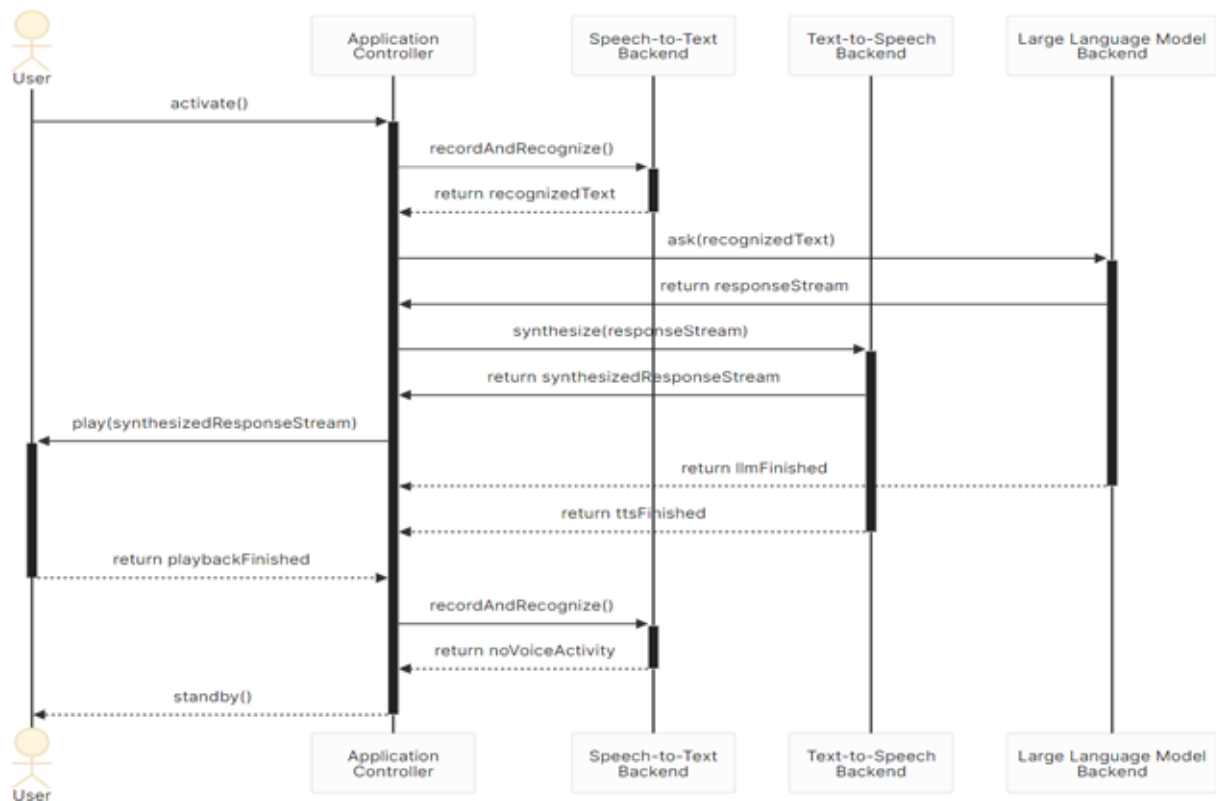


Рис. 1. UML-діаграма послідовності взаємодії компонентів та користувача

Для реалізації модулів проєкту обрано й протестовано низку україномовних моделей для синтезу та розпізнавання, які представлені в репозиторії проєкту Speech Recognition & Synthesis for Ukrainian [10] та з інших джерел, а також деякі мовні моделі для опрацювання й генерування тексту.

У якості моделі для розпізнавання мовлення було обрано whisper-small-uk-v2 [13] за високу точність розпізнавання українського голосу. Модель було перетворено з CTranslate2 для сумісності з faster_whisper. Для синтезу мовлення обрано StyleTTS2 Ukrainian [11] за відсутність сторонніх шумів у синтезованому аудіо, низьку кількість помилок наголошування та виразність. Як LLM обрано Gemma 3 4B Instruct Q4_K_M GGUF за швидкість роботи та можливість виведення у форматі JSON, що полегшує інтеграцію моделі.

Можливості налаштування асистента під потреби користувачів включають персоналізацію контексту, форматів відповідей та додавання спеціалізованих функцій для використання сторонніх інструментів. Додавання контексту в розмову за допомогою контекстних підказок (prompts) чи інструментів RAG сприятиме кращій взаємодії. Конкретний формат відповіді дозволяє зберігати історію спілкування моделі, розділяти співрозмовників, перехоплювати повідомлення, наприклад, для виконання команд. Для мовної моделі проста JSON-схема формату спілкування може виглядати наступним чином:

```
{ "type": "json_object",
  "schema": {
    "type": "object",
    "properties": {
      "actor_from": {"type": "string"},
      "actor_to": {"type": "string"},
      "message": {"type": "string"},
      "context": {"type": "array", "items": {"type": "string"} }
    },
    "required": [ "actor_from", "actor_to", "message" ] } } }
```

Для отримання аудіопотоку використовуватиметься PyAudio. Аудіо ділиться на шматки по 1-4 секунди частотою дискретизації 16 кГц й відправляється моделі для розпізнавання. Для відтворення достатньо використовувати python-sounddevice.

Реалізація та тестування демонстраційного проєкту. Ціллю проєкту є перевірка життєздатності ідеї реалізації асистента балансуючи вимоги до апаратного забезпечення, якості і швидкості розпізнавання, опрацювання та синтезу й здатність працювати в середовищі з наявністю незначних шумів. Як уже відзначалося, модель Whisper вирізняється точністю розпізнавання в умовах шуму. Моделі Gemma 3 адаптовані для слабких пристроїв. StyleTTS 2 показує високу якість синтезу, а помилки наголошення можуть бути частково виправлені попередньою обробкою тексту. Описана раніше архітектура дозволяє розділити компоненти й об'єднати їх через мережу. Балансуючи параметри цих окремих систем можна звести вартість реалізації до мінімуму навіть підвищуючи продуктивність та якість комунікації.

Для тестування часу опрацювання мовлення прототип запущено в синхронному режимі, щоб оцінити продуктивність кожної моделі без впливу на неї іншої. «Прогрів» компонентів триває близько 150 секунд уперше й близько 45 секунд кожного наступного запуску. Споживання оперативної пам'яті досягає 24 ГіБ, відеопам'яті NVIDIA GeForce GTX 1660 – всі 6 ГіБ. Діалог складався з речень без запитів на пояснення чи довгих описів – усього 10 ітерацій циклу (20 коротких реплік). Витрати часу на кожну фазу опрацювання мовлення ітерації циклу діалогу, контрольний час запису та програвання аудіо, а також середні значення (СЗ) наведено в таблиці 1 та на рисунку 2.

Таблиця 1

Витрачений час на кожну фазу ітерації циклу діалогу короткими реченнями

Фаза діалогу	Тривалість фази ітерації, с										СЗ
Запис аудіо	12.0	12.0	10.0	14.0	10.0	10.0	10.0	8.0	8.0	6.0	10.0
Розпізнавання	11.1	18.5	12.9	19.2	13.7	10.0	10.0	14.3	8.4	6.4	12.4
Генерування відповіді	2.2	2.3	2.1	3.5	2.1	2.9	4.0	3.0	2.3	1.8	2.6
Синтез мовлення	1.0	1.0	1.0	1.7	0.9	1.4	2.1	1.4	1.1	0.9	1.3
Відтворення	10.2	12.4	11.3	17.5	7.9	15.2	20.5	11.2	7.8	6.4	12.0

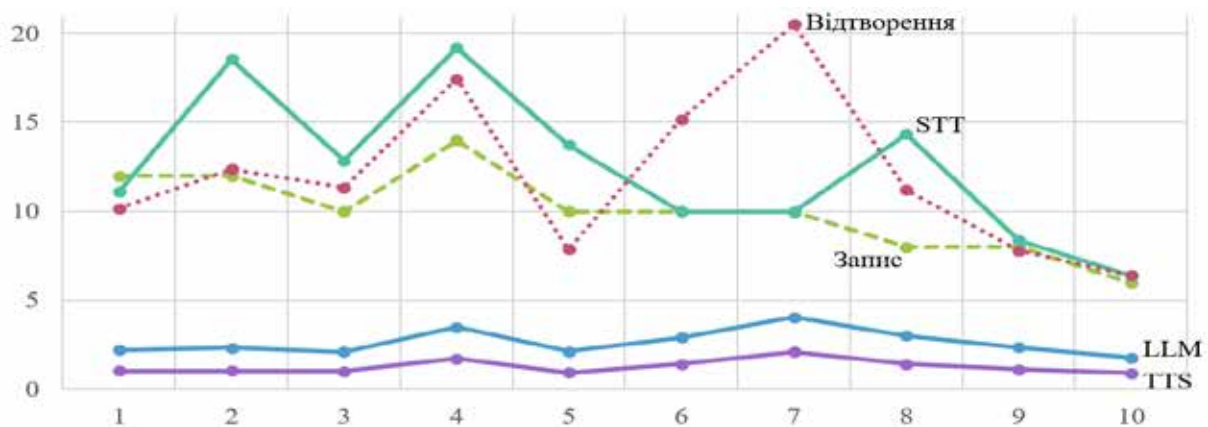


Рис. 2. Візуалізація часу, витраченого на кожну фазу циклу

Моделі опрацювання та синтезу справляються із завданнями добре, у той час як Whisper є найвимогливішою до часу та ресурсів. У синхронному режимі ітерація діалогу триває близько 40 секунд, але час на опрацювання запиту моделями від кінця запису до початку відтворення складає близько 16 секунд, що є ідеальною тривалістю повної ітерації циклу за реалізації асинхронного режиму не враховуючи змін до архітектури прототипу й набору моделей.

Висновки. У цій статті було розглянуто ключові аспекти створення автономного україномовного голосового асистента на основі відкритих технологій розпізнавання, опрацювання та синтезу мовлення. Основна увага приділялася аналізу сучасних моделей, інструментів та методів для досягнення високої якості, низької затримки, гнучкості налаштування, щоб підкреслили здатності сучасних технологій та наявність усіх можливостей розробляти автономні системи без залежності від сторонніх сервісів чи хмарних платформ.

Дослідження засобів опрацювання мовлення підкреслило перспективні інструменти для реалізації системи залежно від вимог кінцевого проєкту. Було проаналізовано й протестовано способи зменшення розмірів моделей, а також технології для прискорення їх інференції, щоб сформувати систему, здатну забезпечити продуктивність у реальному часі.

На основі отриманих результатів тестування можна стверджувати, що розвиток відкритих технологій відкриває нові горизонти для створення персоналізованих і доступних голосових асистентів. Необхідність незалежних голосових систем очевидна, коли приватність й автономність стають пріоритетними, а відкриті технології створюють можливість для розробників розвивати локальні рішення, що не залежать від сторонніх платформ. Майбутні дослідження можуть зосередитися на вдосконаленні інтерактивності, зменшенні затримок та покращенні продуктивності. Окремим напрямком можна відзначати розроблення моделей типу voice-to-voice (голос-до-голосу) для прямої взаємодії користувача та мовної моделі в реальному часі.

Список використаних джерел:

1. Bernard M., Titeux H. Phonemizer: Text to Phones Transcription for Multiple Languages in Python. *Journal of Open Source Software*. Vol. 6, Issue 68. P. 3958. DOI:10.21105/joss.03958.
2. Coqui TTS – deep learning toolkit for Text-to-Speech, battle-tested in research and production. *GitHub*. URL: <https://github.com/coqui-ai/TTS>.
3. DeepSpeech is an open source embedded (offline, on-device) speech-to-text engine which can run in real time on devices ranging from a Raspberry Pi 4 to high power GPU servers. *GitHub*. URL: <https://github.com/mozilla/DeepSpeech>.
4. eSpeak NG is an open source speech synthesizer that supports more than hundred languages and accents. *GitHub*. URL: <https://github.com/espeak-ng/espeak-ng>.
5. Gemma Team, Google Deepmind. Gemma 3 Technical Report. URL: <https://storage.googleapis.com/deepmind-media/gemma/Gemma3Report.pdf>.
6. Kim S., Shih K. J., Badlani R. et al. P-Flow: A Fast and Data-Efficient Zero-Shot TTS through Speech Prompting. *Thirty-seventh Conference on Neural Information Processing Systems*. (2023). URL: <https://openreview.net/forum?id=zNA7u7wtIN>.
7. Mistral AI Models Overview. *Mistral AI Documentation*. URL: https://docs.mistral.ai/getting-started/models/models_overview.
8. NVIDIA NeMo Framework ASR Models. *NeMo Framework User Guide*. URL: <https://docs.nvidia.com/nemo-framework/user-guide/latest/nemotoolkit/asr/models.html>.
9. Shih K. J., Valle R., Badlani R. et al. RAD-TTS: Parallel Flow-Based TTS with Robust Alignment Learning and Diverse Synthesis. *ICML Workshop on Invertible Neural Networks, Normalizing Flows, and Explicit Likelihood Models*(2021). URL: <https://openreview.net/forum?id=ONQwnnwAORi>.
10. Speech Recognition & Synthesis for Ukrainian. *GitHub*. URL: <https://github.com/egorsmkv/speech-recognition-uk>.
11. StyleTTS2 Ukrainian Demo. *Hugging Face*. URL: <https://huggingface.co/spaces/patriotykyk/styletts2-ukrainian>.
12. Whisper is an automatic speech recognition (ASR) system trained on 680,000 hours of multilingual and multitask supervised data collected from the web. *OpenAI*. URL: <https://openai.com/index/whisper>.
13. whisper-small-uk-v2. *Hugging Face*. URL: <https://huggingface.co/nikes64/whisper-small-uk-v2>.
14. Baevski A., Hsu W.-N., Xu Q. et al. Data2vec: A General Framework for Self-supervised Learning in Speech, Vision and Language. URL: <https://ai.meta.com/research/data2vec-a-general-framework-for-self-supervised-learning-in-speech-vision-and-language>.
15. Chung Y.-A., Zhang Y., Han W. et al. W2v-BERT: Combining Contrastive Learning and Masked Language Modeling for Self-Supervised Speech Pre-Training. *arXiv*, 2021. DOI:10.48550/ARXIV.2108.06209.
16. Li Y. A., Han C., Raghavan V. S. et al. StyleTTS 2: Towards Human-Level Text-to-Speech through Style Diffusion and Adversarial Training with Large Speech Language Models. *arXiv*, 2023. DOI:10.48550/ARXIV.2306.07691.
17. Touvron H., Lavril T., Izacard G. et al. LLaMA: Open and Efficient Foundation Language Models. *arXiv*, 2023. DOI:10.48550/ARXIV.2302.13971.

УДК 004.738.5:681.5:66

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.11>**Артем КАМЕНСЬКИЙ**

аспірант кафедри інформаційної безпеки та комп'ютерної інженерії,
Черкаський державний технологічний університет, a.o.kamenskyi.asp21@chdtu.edu.ua
ORCID: 0000-0001-7440-2860

Віра БАБЕНКО

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри інформаційної безпеки та комп'ютерної інженерії,
Черкаський державний технологічний університет, v.babenko@chdtu.edu.ua
ORCID: 0000-0003-2039-2841

ДОСЛІДЖЕННЯ АКТУАЛЬНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ ЯК СКЛАДОВОЇ ЧАСТИНИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ХІМІЧНОЇ ГАЛУЗІ

Анотація. У роботі розглянуто результати досліджень актуальності впровадження в хімічну галузь такої інноваційної технології як Інтернет речей (IoT, Internet of Things). Сучасні хімічні підприємства особливу увагу приділяють автоматизації та засобам контролю. Це важливо, не тільки з точки зору отримання якісних кінцевих продуктів, а й для підтримки заданих технологічних режимів, аналізу стану обладнання та безпеки виробництва в цілому. Тому, більшість великих підприємств, що виробляють мінеральні добрива, хімічні реагенти і т.д., для автоматизації та моніторингу застосовують системи SCADA. Швидкий розвиток технологій дав можливість впровадження системи моніторингу IoT в різні напрями господарювання, що досліджено в статті. У роботі надано порівняльний аналіз відмінностей контролю виробничих процесів за допомогою SCADA – систем і сучасної інноваційної концепції IoT.

Метою статті є комплексне дослідження можливостей та перспектив впровадження технологій Інтернету речей (IoT) у хімічні виробництва шляхом застосування методів пошуку, аналізу, зіставлення та узагальнення даних з інформаційних джерел.

Методологія. Для досягнення поставленої мети було здійснено систематичний аналіз наукових публікацій, статей та технічних звітів, присвячених особливостям архітектури Інтернету речей (IoT), практиці його впровадження в різних галузях промисловості, а також перевагам і викликам, пов'язаним із використанням цієї технології. Такий підхід дозволив сформувати цілісне уявлення про потенціал IoT у сфері хімічного виробництва та об'єктивно оцінити актуальність його впровадження в контексті сучасних українських реалій. Застосований в роботі метод порівняння технологій контролю дає можливість оцінити подібності та розбіжності SCADA та IoT.

Наукова новизна. У статті представлено порівняльну характеристику технологій контролю за наступними параметрами: призначення та функції, архітектура, типи даних, управління та контроль, масштабованість, застосування в хімічній галузі. Окрему увагу приділено оцінці доцільності інтеграції IoT у вже діючі системи автоматизованого управління виробничими процесами.

Висновки. Кожна з систем контролю та управління, моніторингу та обробки даних (SCADA та IoT) має свої переваги та недоліки. Визначено, що для якісної роботи сучасного хімічного підприємства доцільно застосовувати переваги обох технологій, створюючи якісне середовище, оптимізоване як для автоматизації процесів, так і для аналізу даних.

Ключові слова: IoT, Інтернет речей, система SCADA, хімічна промисловість, автоматизація, цифрові технології.

Artem KAMENSKYI, Vira BABENKO. RESEARCH ON THE RELEVANCE OF IMPLEMENTING THE INTERNET OF THINGS AS A COMPONENT OF AUTOMATION IN THE CHEMICAL INDUSTRY

Abstract. The paper considers the results of research into the relevance of introducing such innovative technology as the Internet of Things (IoT) into the chemical industry. Modern chemical enterprises pay special attention to automation and control tools. This is important not only from the point of view of obtaining high-quality final products, but also for maintaining specified technological modes, analyzing the condition of equipment and production safety in general. Therefore, most large enterprises that produce mineral fertilizers, chemical reagents, etc. use SCADA systems for automation and monitoring. The rapid development of technologies has made it possible to introduce an IoT monitoring system into various areas of business, which is investigated in the article. The paper provides a comparative analysis of the differences in controlling production processes using SCADA systems and the modern innovative concept of IoT.

The purpose of the article is a comprehensive study of the possibilities and prospects for the implementation of Internet of Things (IoT) technologies in chemical production by applying methods of search, analysis, comparison and generalization of data from information sources.

Methodology. To achieve the set goal, a systematic analysis of scientific publications, articles and technical reports was carried out, devoted to the features of the Internet of Things (IoT) architecture, the practice of its implementation in various industries, as well as the advantages and challenges associated with the use of this technology. This approach allowed us to form a holistic picture of the potential of IoT in the field of chemical production and to objectively assess the relevance of its implementation in the context of modern Ukrainian realities. The method of comparing control technologies used in the work makes it possible to assess the similarities and differences of SCADA and IoT.

Scientific novelty. The article presents a comparative characteristic of control technologies according to the following parameters: purpose and functions, architecture, data types, management and control, scalability, application in the chemical industry. Special attention is paid to assessing the feasibility of integrating IoT into existing automated production process control systems.

Conclusions. Each of the control and management, monitoring and data processing systems (SCADA and IoT) has its own advantages and disadvantages. It has been determined that for the high-quality operation of a modern chemical enterprise it is advisable to apply the advantages of both technologies, creating a high-quality environment optimized for both process automation and data analysis.

Key words: IIoT, Internet of Things, SCADA system, chemical industry, automation, digital technologies.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Сучасні інформаційні технології мають все більший вплив на всі сфери суспільного сьогодення. Завдяки стрімкому розвитку засобів цифровізації, що відбувається останніми роками, інформаційна складова суспільства нестримно змінюється, роблячи тим самим сильний вплив на всі сторони життя і діяльності людей. В промисловості, з розвитком технологій, все більше підприємств і секторів використовують новітні цифрові інновації, щоб зробити свої процеси ефективнішими, а автоматизацію виробництв більш сучасною. Інтернет речей (IoT) є однією з таких технологій, яка повільно, але впевнено стає все більш поширеною в суспільстві та займає значне місце в різних галузях промисловості. Зараз технологію IoT використовують в багатьох індустріях: медицині, сільському господарстві, тваринництві, логістиці, транспорті та виробництві.

Однією з таких галузей, яку доцільно розглянути, є хімічна. Хімічна промисловість – один із ключових секторів економіки України, охоплює хімічний, нафтохімічний та фармацевтичний сегменти. Якісний стан автоматизації, контролю та моніторингу технологічних процесів має пріоритетне значення для цієї галузі.

Впроваджуючи нові цифрові технології, хімічні виробництва, щоб залишатися конкурентоспроможними, включають в свою діяльність IoT і машинне навчання, щоб задовольнити потреби та тенденції світу, які постійно змінюються. Під терміном «Інтернет речей» (IoT, Internet of Things) розуміють мережу фізичних об'єктів, які мають вбудовані технології, що дозволяють здійснювати взаємодію з зовнішнім середовищем, передавати відомості про свій стан і приймати дані ззовні. Основою Інтернету речей (IoT) є технологія взаємодії машин (M2M), коли машини за допомогою мобільних мереж обмінюються інформацією між собою або передають її в системи обробки і накопичення даних [7]. Складовою частиною, або підкатегорією, Інтернету речей є Індустріальний (або Промисловий) Інтернет речей (Industrial Internet of Things, IIoT). Він представляє собою промислову версію Інтернету речей і застосовується у виробничому та технічному середовищі. IIoT надає інформацію в режимі реального часу для кращого операційного контролю та більш ефективного виробництва, оптимізує процеси технічного обслуговування, скорочує час простоїв і більш ефективно використовує ресурси. Промисловий Інтернет речей можна масштабувати та адаптувати до вимог певного виробництва [10, 21].

Проблематикою роботи є дослідження питання необхідності та доцільності застосування Інтернету речей, як частини автоматизації виробництв в хімічній галузі. Потрібно зазначити, що хімічна промисловість України вважається однією з галузей економіки, що є пріоритетними для держави. Від рівня її розвитку прямо залежать загальні показники макроекономіки. Не зважаючи на складні умови та воєнні дії в Україні, сектор хімічної промисловості зберігає свої позиції, утворюючи приблизно 4% від національного ВВП і має потенціал для подальшого зростання [15]. Так як дана галузь має велике значення для життєдіяльності різних напрямів економіки, а впровадження Інтернету речей в хімічну промисловість є ще недостатньо вивченим процесом, то існує необхідність аналізу доцільності застосування новітніх цифрових технологій в автоматизований процес виробництва в реаліях українського сьогодення.

Об'єктом дослідження є застосування цифрових технологій в хімічній галузі. Предмет досліджень – аналіз впровадження технології Промислового Інтернету речей як частини автоматизації хімічного виробництва.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Огляд теми Інтернету речей проводилось багатьма авторами наукових та Інтернет – статей в різних галузях промисловості [19, 18, 11]. Дослідники зосереджують свою увагу на застосуванні Інтернету речей як невід'ємної частини автоматизації виробництва. Інтернет речей (IoT) – це система, яка об'єднує різні прилади, датчики та пристрої в одну мережу через доступні канали зв'язку. Вони взаємодіють між собою за допомогою різних протоколів та використовують єдиний протокол (IP) для підключення до глобальної мережі (мережа Інтернет). Це процеси безперервного збору, передачі та аналізу даних, що забезпечують автоматизоване управління пристроями без втручання людини. Архітектура Інтернету речей, в загальному вигляді, складається

з сенсорів, мережі та серверів для обробки даних. Сенсори збирають інформацію з навколишнього робочого середовища, а мережа передає ці дані до серверів, де вони обробляються та аналізуються для подальшого використання. В хімічній промисловості, в якості сенсорів, використовують датчики температури, тиску, вологості та якості повітря, рівнеміри, витратоміри і т.д. В якості мережі застосовують: Wi-Fi, Bluetooth, LoRaWAN, 5G тощо – залежить від вимог до дальності, швидкості передачі даних та енергоспоживання. Ця архітектура дозволяє здійснювати автоматичний контроль і керування різними системами та процесами. Хмарні сервіси забезпечують зберігання великих обсягів даних та їх обробку в режимі реального часу [2]. В роботах [11, 4, 14] представлені архітектурні рішення для побудови системи Інтернету речей і, в залежності від реалізацій, вони можуть відрізнятися.

Актуальність застосування IoT представлені в статтях, які давали оцінку впровадженню інновації в різні сфери господарювання: в енергетиці (для автоматизації та оптимізації енергоспоживання) [12], у сфері охорони здоров'я (поліпшення якості послуг, успіхи в технології біосенсорів, осучаснення діагностики) [6], економіці й сільському господарстві (аналіз ґрунтів, періодичність введення добрив, застосування дронів) [16, 1], логістиці (ефективна і точна доставка продукції, моніторинг та управління транспортними засобами) та адмініструванні (при впровадженні електронного урядування) [13, 5], будівельній сфері (розумні будинки, старт – будівництво, системи автоматизації) [3]. Автори охарактеризували в своїх роботах різні напрямки застосування Інтернету технологій та очікувані переваги та недоліки.

Мета статті – дослідити методами пошуку, аналізу, зіставлення та узагальнення даних інформаційних джерел можливості та перспективи впровадження Інтернету речей в хімічні виробництва. Створення порівняльної характеристики Інтернету речей та системи SCADA для хімічних виробництв.

Виклад основного матеріалу. В сучасній хімічній промисловості більшість процесів автоматизовані. **Для цього застосовують автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУТП)** – людино-машинну систему управління, що забезпечує автоматизований збір і обробку інформації, необхідної для оптимізації управління технологічним об'єктом відповідно до прийнятого критерію. **Впровадження АСУТП** обумовлюється наявністю сучасних автоматичних засобів збору та обробки інформації, насамперед засобів обчислювальної техніки. Людина, як суб'єкт праці, бере участь у прийнятті рішень з управління. Важливим аспектом є реалізація в системі процесу обробки технологічної та техніко-економічної інформації. Основною метою функціонування АСУТП є оптимізація роботи технологічного об'єкта управління за визначеними критеріями, шляхом правильного вибору керуючих впливів. Критерієм управління зазвичай є техніко-економічний показник (наприклад, собівартість вихідного продукту при заданій його якості) або технічний показник (наприклад, параметри процесу – тиск, температура, витрати або характеристики вихідного продукту) [8].

SCADA. Використання технології комп'ютерного контролю, моніторингу та регулювання дозволяє точно дозувати сировину, підтримувати заданий технологічний режим, ефективно контролювати постачання енергії та безпечно управляти процесами. Все це на сучасних заводах виконує система SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) – система диспетчерського контролю та збору даних програмного та апаратного забезпечення, яка дозволяє контролювати процеси виробництва та обробку інформації як з локальних, так і з віддалених місць. Основні структурні елементи SCADA – системи: людино-машинний інтерфейс, система нагляду, віддалені термінали, програмовано-логічні контролери (ПЛК), інфраструктура зв'язку, програмування SCADA. Усі ці елементи разом формують ефективну систему управління, в якій людино-машинний інтерфейс виконує функцію пристрою для введення та виведення даних, дозволяючи оператору керувати процесами. Комунікаційним центром системи є сервер диспетчеризації, який забезпечує зв'язок між інтерфейсом оператора та іншими компонентами, зокрема ПЛК і сенсорами. Віддалені термінали передають зібрані дані до систем моніторингу. ПЛК взаємодіють із сенсорами та датчиками, відіграючи ключову роль у забезпеченні безперервного контролю за промисловими процесами в реальному часі [9]. Система SCADA не є системою повного контролю виробництва, вона скоріше виконує наглядову функцію та має свої переваги і недоліки. Серед переваг можна відмітити: можливість збереження великої кількості даних, забезпечення інтерфейсу для підключення тисячі датчиків моніторингу та керування, можливість отримати симуляцію реальних даних, резервне копіювання даних в разі несправностей та збоїв, швидкість отримання відповідей, обробка даних в реальному часі; виявлення та локація несправностей і т.д. До недоліків можна віднести: складність SCADA на основі ПЛК, що потребує висококваліфікованих програмістів, аналітиків та операторів; високі витрати на монтаж; система підтримує обмежене програмне та апаратне обладнання; збій системи може призвести до критичних наслідків. Фактор скорочення людської сили можна віднести як до переваг, так і до недоліків.

IoT. Розвиток сучасних технологій змінює спосіб моніторингу, контролю та оптимізації хімічних процесів на підприємствах, розширюючи межі ефективності, безпеки та інновацій. Завдяки потужним цифровим з'єднанням нового покоління, зокрема технології IIoT (промислова версія), відбувається трансформація промислових процесів. Це передбачає інтеграцію датчиків, пристроїв і обладнання з Інтернетом для збору та обміну даними в режимі реального часу, що сприяє підвищенню рівня автоматизації виробництва та прийняттю рішень на основі об'єктивної аналітики [21]. Використання бездротових пристроїв з підтримкою IP-протоколу, включаючи смартфони, планшети, датчики, дає можливість швидкому прийняттю рішень. Архітектура IIoT не має стандартної кількості рівнів, але ключовими є [17, 21]:

1. Фізичний рівень (сенсорний) – групує датчики та виконавчі механізми, призначені для обміну даними з промислового процесу в реальному часі.
2. Мережевий рівень – включає технології, протоколи зв'язку (включаючи 5G, Wi-Fi, LoRaWan тощо) та інтерфейси для обміну даними між рівнями.
3. Рівень проміжного програмного забезпечення – призначений для збору та обробки даних, включаючи зберігання, фільтрацію, агрегацію, обчислення та аналіз інформації з мережевого рівня.
4. Рівень програми (прикладний рівень) – включає програмні рішення для візуалізації даних, управління виробництвом, моніторингу, прогнозування технічного стану обладнання, а також підтримки процесів прийняття рішень.

Найважливіші функції інтелектуального хімічного виробництва, за які відповідає Промисловий Інтернет речей [20]: автоматизований ланцюг поставок (аналіз рівнів запасів та стан доставки в реальному часі); управління запасами хімічних речовин у режимі реального часу (контроль рівня запасів сировини та матеріалів); попередження хімічних небезпек (витоків газів, хімікатів, підвищення рівня шуму і т.д.); послідовний контроль якості продуктів; швидке відстеження сировини (місцезнаходження та рух сировини й готової продукції); управління формулами на основі IoT (коригувати формули в режимі реального часу на основі змін наявності чи ціни матеріалів); прогнозне управління обладнанням (для прогнозування та запобігання поломкам або несправностям, оптимізації графіків технічного обслуговування та замовлення запасних частин в разі необхідності).

Такий сучасний підхід до автоматизації знижує витрати, мінімізує час простою та підвищує продуктивність виробників. Порівняльний аналіз основних характеристик системи SCADA та технології IoT для автоматизації виробництва хімічної галузі (табл. 1) дає змогу виявити ключові відмінності у підходах до збору, обробки та використання даних.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз критеріїв впровадження системи SCADA та IoT (Інтернету речей) для хімічних виробництв

Критерії	SCADA	IoT (Інтернет речей)
1	2	3
Призначення та функції:	– Основне призначення – контроль, моніторинг та управління виробничими процесами в реальному часі. – SCADA системи використовуються для збору даних від датчиків, контролю та автоматизації процесів на промислових підприємствах, таких як хімічні заводи. Вони дозволяють операторам отримувати дані з різних джерел і приймати рішення на основі цих даних. – Зазвичай працюють з великими, централізованими системами управління, де контроль здійснюється з одного або кількох пультів управління.	– IoT у хімічній галузі застосовується для інтеграції численних датчиків та пристроїв, які можуть збирати дані не тільки в межах заводу, але й за його межами. – IoT дає можливість підключати різні пристрої до Інтернету, що дозволяє дистанційно моніторити та аналізувати дані. – IoT спрямований на з'єднання фізичних об'єктів та пристроїв в єдину мережу для обміну інформацією та автоматизації процесів.
Архітектура	– Має централізовану архітектуру, де дані збираються і обробляються на одному або кількох серверах, а операторам надаються інтерфейси для моніторингу та управління процесами. – Це система, орієнтована на специфічні промислові об'єкти і часто має великий набір спеціалізованих пристроїв.	– Має більш дистрибутивну архітектуру, де пристрої та датчики можуть бути частинами великої мережі, а обробка даних може здійснюватися не тільки на місці, але й у хмарі. Це дозволяє віддалено контролювати і аналізувати дані з різних точок по всьому світу.

Закінчення табл. 1

1	2	3
Типи даних	– Основна увага приділяється даним в реальному часі, таким як тиск, температура, рівень рідини, потік, концентрація хімічних речовин і т.д. – SCADA може забезпечувати контроль над аварійними ситуаціями або збоями в процесах, і часто використовує попередньо налаштовані пороги для активізації сигналів або запуску автоматичних дій.	– IoT може збирати набагато більше різноманітних даних, включаючи інформацію про стан пристроїв, умови навколишнього середовища, а також використання таких технологій як штучний інтелект, для аналізу трендів та прогнозування. – Дані з IoT можуть бути більш багатогранними і включати як інформацію в реальному часі, так і історичні дані для більш глибокого аналізу.
Управління та контроль	– Фокусується на безпосередньому управлінні процесами, надаючи операторам можливість здійснювати контроль в реальному часі за допомогою графічних інтерфейсів та автоматичних систем. – Основна мета – забезпечення безпеки і безперебійної роботи виробничих процесів.	– Орієнтовано на віддалене управління і моніторинг, а також на обробку великих обсягів даних для виявлення трендів, аномалій та прогнозування майбутніх потреб чи поломок. – IoT може бути частиною великої системи аналізу даних і включати автоматизацію на основі великих обсягів інформації, яку збирають датчики.
Масштабованість	Зазвичай використовується для моніторингу і управління конкретними об'єктами або секціями заводу. Розширення або модернізація системи SCADA часто вимагає значних інвестицій.	IoT є більш масштабованим і гнучким, дозволяючи інтегрувати пристрої по всьому підприємству або навіть на кількох підприємствах. Можна додавати нові пристрої та датчики без значних складнощів.
Застосування в хімічній галузі	Часто використовується для моніторингу та управління критичними процесами в хімічних реакціях, контролює температуру, тиск, рівень речовин, витрати та інші показники в реальному часі.	Може використовуватися для збору даних з безлічі точок на підприємстві, включаючи моніторинг стану обладнання, а також для аналізу даних для виявлення потенційних проблем (наприклад, знос обладнання) або для оптимізації витрат на енергію.

Висновки. Отже, хімічне виробництво – це не тільки процес отримання продукції певного напрямку, але й великий бізнес-проект, в який залучені великі кошти. На сьогодні, українські підприємства переживають складні часи через втрату логістичних зв'язків, порушення цілісності виробничих приміщень та обладнання за рахунок військових дій, підвищений контроль безпеки та різні енергетичні виклики. Всі ці фактори впливають на впровадження новітніх технологій таких як IIoT: з одного боку – це вкладення додаткових фінансів на оновлення системи контролю та керування, з іншого боку – це покращення якості виробництва в цілому.

Аналізуючи представлені технології автоматизації можна відзначити, що системи SCADA історично орієнтовані на централізований моніторинг і керування технологічними процесами в реальному часі, переважно в межах закритих, локальних мереж. Вони характеризуються високою надійністю, стабільністю та чітко визначеними функціями управління. Технологія IIoT – і, особливо її промислове відгалуження IIoT, – передбачає децентралізований підхід, розширення можливостей інтеграції з хмарними сервісами, аналітикою великих даних та штучним інтелектом. IIoT-системи мають гнучкішу архітектуру, підтримують значно більшу кількість підключених пристроїв та забезпечують масштабованість, що важливо в умовах швидкозмінних виробничих середовищ. Завдяки цим характеристикам, **IIoT-технології розширюють функціональність традиційних SCADA-систем**, дозволяючи реалізовувати нові моделі взаємодії з виробничими об'єктами, включно з віддаленим моніторингом, прогнозним обслуговуванням і адаптивним управлінням. Таким чином, аналіз демонструє, що IIoT не стільки замінює SCADA, скільки доповнює її, формуючи нову модель цифрового виробництва.

Список використаних джерел:

1. Дідич З. «Інтернет речей»: можливості та перспективи їх використання у сільському господарстві України. *Аграрна економіка*. 2018. Т. 11, № 1-2. С. 88–93. URL: <https://doi.org/10.31734/agrarecon2018.01.088>
2. Інтернет речей: що це і як він працює. URL: <https://gigatrans.ua/ua/news/internet-vesh-ey-chto-eto-takoe-i-kak-on-rabotaet> (дата звернення 18.01.2025).
3. Інтернет речей (IIoT) в будівництві та ремонті: Смарт-рішення. URL: <https://resheniya.com.ua/uk/internet-rechej-iiot-v-budivnictvi-ta-remonti-smart-rishennya/> (дата звернення 19.01.2025).

4. Коробейнікова Т., Іськович Т. Організація архітектури системи IoT в протокольному стекові. *Grail of Science*. 2023. № 27. С. 341–346. URL: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.12.05.2023.053>
5. Круц А. О. Сучасні тенденції застосування технологій Інтернет речей при впровадженні електронного урядування на місцевому рівні. URL: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://ktpu.kpi.ua/wp-content/uploads/2019/12/naukovo-doslidna-robota-studentiv-kruts-2019.pdf> (дата звернення 19.01.2025).
6. Макаренко М. В. Особливості впровадження технологій Інтернету речей (Internet of Things, IoT; Internet of Medical Things, IOMT) у сфері охорони здоров'я. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Державне управління*. 2021. Т. 32 (71), № 2. С. 64–68. URL: <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-6468/2021.2/011>
7. Мішук Є., Мішук Д. Системи промислової автоматизації на основі IoT. *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини*. 2020. № 96. С. 42–50. URL: <https://doi.org/10.32347/gbdmm2020.96.0501>
8. Посібник з лекцій з дисципліни «Автоматизовані системи керування технологічними процесами» / Укладач: Карташов В. В. Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2017. 149 с.
9. Призначення, структура і основні функції SCADA – систем. URL: <http://www.votum.ua/old/uk/publications/scada.htm> (дата звернення 20.01.2025).
10. Промисловий Інтернет речей. URL: <https://www.phoenixcontact.com/uk-ua/tekhnohiiyi/promyslovyi-internet-rechey> (дата звернення 03.12.2024).
11. Самойленко М. Ю. Принципи застосування технологій Інтернет речей у сучасному світі техніки. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2020. Т. 31 (70), № 6. С. 142–148. URL: <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.6-1/24>
12. Сапожник Д. О., Плечистий Д. Д. Використання Інтернету речей для економії енергетичних ресурсів. *Вісник ВПІ*. 2023. Вип. 4. С. 39–45. URL: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-169-4-39-45>
13. Семененко Ю. С. Використання Інтернету речей у виробництві та логістиці. *Наукові інновації та передові технології*. 2024. № 4 (32). URL: <http://perspectives.pp.ua/index.php/auka/article/view/10514/10570> (дата звернення 19.01.2025).
14. Технології інтернету речей. Навчальний посібник: навч. посіб. для студ. спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології» / Б. Ю. Жураковський, І.О. Зенів. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 271 с.
15. Хімічна промисловість України. Найбільші підприємства та аналіз галузі. URL: <https://blog.youcontrol.market/khimichna-promislovist-ukrayini/> (дата звернення 03.12.2024).
16. Шапуров О. Інтернет речей (IoT): економічний розвиток та можливі наслідки. *Гуманітарний вісник Запорізької державної інженерної академії*. 2019. № 77. С. 199–202. URL: <https://doi.org/10.30839/2072-7941.2019.189298>
17. David Calderón, Francisco Javier Folgado, Isaías González, Antonio José Calderón Implementation and Experimental Application of Industrial IoT Architecture Using Automation and IoT Hardware/Software. *Sensors*. 2024. Vol. 24, Iss. 24. URL: <https://doi.org/10.3390/s24248074>
18. Khan W.Z., Rehman M.H., Zangoti H.M., Afzal M.K., Armi N., Salah K. Industrial Internet of Things: Recent Advances, Enabling Technologies and Open Challenges. *Computers & Electrical Engineering*. 2020. Vol. 81. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.106522>
19. Onu Peter, Anup Pradhan, Charles Mbohwa Industrial internet of things (IIoT): opportunities, challenges, and requirements in manufacturing businesses in emerging economies. *Procedia Computer Science*. 2023. Vol. 217. P. 856–865. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.282>
20. Smart Manufacturing With IoT: Benefits And Barriers of The Chemical Industry. URL: <https://www.intuz.com/blog/smart-manufacturing-iiot-in-chemical-industry> (дата звернення 25.04.2025).
21. Yarmilko A., Rozlomii I., Naumenko S. Dependability of Embedded Systems in the Industrial Internet of Things: Information Security and Reliability of the Communication Cluster. In: Faure, E., et al. *Information Technology for Education, Science, and Technics. ITEST 2024. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2024. Vol. 222. P. 235–249. Springer, Cham. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-71804-5_16

УДК 005.334:003.2

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.12>**Андрій КОЛЯДА**аспірант кафедри цифрової економіки та системного аналізу, Державний торговельно-економічний університет, a.koliada@knute.edu.ua

ORCID: 0009-0001-4625-4976

СУЧАСНІ МОДЕЛІ РИЗИК-МЕНЕДЖМЕНТУ ІЗ СИСТЕМНИМ ПІДХОДОМ

Анотація. У статті досліджено сутність ризик-менеджменту на основі системного аналізу. Визначено основні принципи та переваги системного аналізу в ризик-менеджменті. Встановлено, що використання системної моделі як єдиного джерела істини для аналізу ризику та надійності призводить до послідовної та повної оцінки. Досліджено основні моделі ризик-менеджменту та визначено складові системного аналізу у моделі ризик-менеджменту. Наведено сфери застосування розглянутих моделей ризик менеджменту.

Метою дослідження є аналіз моделей ризик-менеджменту із системним підходом.

Методологія дослідження включає аналіз наукової літератури, її критичне осмислення, синтез. Застосування такої методології дозволить забезпечити комплексний та глибокий аналіз проблематики, сприятиме розробці ефективної моделі ризик-менеджменту, що враховує специфіку та динаміку сучасного бізнес-середовища.

Наукова новизна полягає у виділенні найбільш адаптованих та гнучких моделей ризик-менеджменту, які враховують системні взаємозв'язки ризиків.

Висновки. В даній роботі прийшли до висновку, що моделі ризик-менеджменту, побудовані на системному аналізі, передбачають визначення ключових елементів ризик-менеджменту, встановлення зв'язків між ними, розробку математичних та логічних процесів для прогнозування та управління ризиками. Встановлено, що моделі ризик-менеджменту сприяють гнучкості організації, дозволяючи швидко реагувати на зміни зовнішнього середовища та внутрішні виклики, що є ключовим фактором виживання та розвитку в умовах невизначеності. Застосування системного підходу передбачає використання передових методів, таких як моделювання розподілів втрат, регресійний аналіз, байєсівські мережі та нечітка логіка, що дозволяє більш точно оцінювати та прогнозувати ризики.

Ключові слова: ризик-менеджмент, системний аналіз, модель, невизначеність, складні системи.

Andrii KOLIADA. MODERN RISK MANAGEMENT MODELS WITH A SYSTEMIC APPROACH

Abstract. The article explores the essence of risk management based on system analysis. The main principles and advantages of system analysis in risk management are identified. It is established that the use of a system model as the only source of truth for risk and reliability analysis leads to a consistent and complete assessment. The main risk management models are investigated and the components of system analysis in the risk management model are identified. The areas of application of the considered risk management models are presented.

The objective of the study is to analyze risk management models with a systemic approach.

Methodology. The research methodology includes an analysis of scientific literature, its critical understanding, synthesis. The use of such a methodology will provide a comprehensive and in-depth analysis of the issue, will contribute to the development of an effective risk management model that takes into account the specifics and dynamics of the modern business environment.

The scientific novelty lies in the selection of the most adapted and flexible risk management models that take into account the systemic interrelationships of risks.

Conclusions. This paper concludes that risk management models based on systems analysis involve identifying key elements of risk management, establishing relationships between them, and developing mathematical and logical processes for forecasting and managing risks. It has been established that risk management models contribute to the organization's flexibility, allowing it to respond quickly to changes in the external environment and internal challenges, which is a key factor in survival and development in conditions of uncertainty. The use of a systems approach involves the use of advanced methods, such as modeling of loss distributions, regression analysis, Bayesian networks, and fuzzy logic, which allows for more accurate risk assessment and forecasting.

Key words: risk management, system analysis, model, uncertainty, complex systems.

Постановка проблеми. У сучасному світі ефективний ризик-менеджмент є одним із найважливіших завдань для будь-якої компанії. Незважаючи на те, що ризики є невід'ємною частиною бізнесу, їх необхідно контролювати та керувати ними, щоб мінімізувати потенційні збитки та збільшити шанси на ефективну діяльність підприємства. Майже у всіх дослідженнях ризиків питання про те, як їх знизити, є дуже актуальним. Однак перед тим, як управляти ризиками, їх необхідно відповідним чином виміряти та змодельовати. Таким чином, три аспекти вимірювання, моделювання та управління ризиками взаємопов'язані, і всі вони повинні розглядатися як однаково важливі, оскільки кожен наступний аспект спирається на попередній, що в свою чергу потребує системного аналізу.

Системний аналіз за визначенням – це сукупність засобів і методів, що використовуються при дослідженні та конструюванні складних та надскладних об'єктів [3]. Насамперед це стосується методів вироблення, прийняття та обґрунтування рішень при проектуванні соціальних, економічних та технічних систем та управління ними. При цьому окремого розгляду потребує системний аналіз

у ризик-менеджменті, що ґрунтується на тому, що всі явища та процеси розглядаються в їх системному зв'язку, враховуючи вплив окремих елементів та рішень на систему в цілому.

Методологічний підхід до такого виду ризик-менеджменту передбачає послідовну декомпозицію складних систем до відносно простих, які можуть бути описані з необхідною мірою невизначеності, а потім проводиться синтез одержуваних результатів. При необхідності можуть проводитися і послідовні ітерації сукупних процесів декомпозиції та синтезу. Такий підхід особливо важливий в умовах повоєнного відновлення країни, так як це складний та багаторівневий процес, який вимагає ефективного управління ризиками. Саме використання моделей ризик-менеджменту на основі системного аналізу сприятиме мінімізації загроз та оптимізації ресурсів в процесі повоєнного відновлення країни.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В наукових працях як вітчизняних, так і зарубіжних фахівців наголошують, що системний підхід у ризик-менеджменті має включати ідентифікацію ризиків, їх кількісну оцінку та розробку стратегій реагування, що дозволяє більш повно та об'єктивно оцінювати потенційні ризики, розробляти стратегії зниження ризику та прогнозувати їх вплив на проект.

Скибінська З., Іщук Е. встановили, що завдяки системному аналізу керівники проєктів можуть приймати обґрунтовані рішення та бути готовими до ризиків, які збільшує ймовірність успішної реалізації проєктів [4]. Скопенко Н. М. визначає основні методи ризик-менеджменту, проте не акцентує увагу на моделях, які при цьому варто застосовувати [5].

Більшість науковців розглядають загальні аспекти формування ризик-менеджменту, але мало уваги приділяють саме системному підходу до побудови їх моделей. Застосування системного аналізу у ризик-менеджменті для проєктів повоєнного відновлення є не достатньо дослідженим, а наявні напрацювання мають фрагментарний характер, тобто досліджуються переважно окремі ризики без їх взаємозв'язку, що без системного аналізу важко зробити.

Метою статті є аналіз моделей ризик-менеджменту із системним підходом.

Виклад основного матеріалу дослідження. Ризики – це будь-які потенційні загрози, які можуть негативно вплинути на бізнес підприємства та економіку в цілому. Вони можуть виникати у будь-якій сфері діяльності та бути пов'язані з різними факторами, такими як економічні, фінансові, політичні, технічні, природні, соціальні та інші [4].

Оцінка ризику – це процес визначення причини та ступеня ризику шляхом аналізу множинних небезпек та виявлення умов уразливості, які в сукупності можуть завдати шкоди схильним елементам [1]. Цілісна оцінка ризику включає у себе як оцінку ймовірності втрат, так й забезпечує повне розуміння причин і наслідків цих втрат. Тому знання та аналіз ризику становлять найважливішу частину процесу прийняття рішень. Усвідомлення та розуміння ризику, де наявність достовірної інформації про ризик та відповідна трансляція цієї інформації є ключовим інструментом підвищення поінформованості про ризики та, відповідно, вжиття заходів щодо їх зниження.

Системний аналіз перебуває у центрі більшості аналізів ризиків. Розбираючи систему, її розбивають на класи сценаріїв, які дозволяють аналітику краще зрозуміти, як система може вийти з ладу. Два найбільші класи ризиків – це залежність від зовнішніх чинників та людські помилки.

Системний аналіз дозволяє розглядати ризик-менеджмент як комплексну динамічну систему, що включає взаємопов'язані елементи та враховує як внутрішні, так і зовнішні чинники. Системний підхід до аналізу ризику вимагає розгляду джерела ризику.

Системна оцінка ризиків дозволяє завчасно відслідковувати та оцінювати складні, мінливі бізнес-ризики за декількома напрямками, включаючи: катастрофічні ризики, кіберризики, ризики екологічного та соціального управління (ESG), геополітичні ризики, фінансові ризики, ризики обмежень у всій мережі ділових відносин.

Ключовим завданням системного аналізу є формування стратегічно обґрунтованих рішень у сфері вибору стратегій, інструментів та ризик-мінімізуючих методик. Також дослідження системного аналізу ризиків має першочергове значення для розуміння та передбачення впливу різномірних факторів на еволюцію, та структурну перебудову світової економічної системи, включаючи розробку комплексу ефективних методів мінімізації чи нейтралізації потенційних негативних ефектів від економічних шоків.

У рамках нової ери цифрової економіки та нейро-цифрових трансформацій, на зорі третього тисячоліття було помічено тенденцію до еволюції систем управління ризиками, орієнтованих на модель «згори вниз». Ця концепція передбачає інтеграцію та синхронізацію різних ризикових факторів у рамках єдиного мультифакторного середовища, приділяючи увагу знаходженню оптимального балансу між специфічними моделями для окремих категорій ризиків та глобальною моделлю універсального, інтегрованого ризику. Вищезазначене свідчить про підвищення ролі системного аналізу в ризик-менеджменті. При цьому варто виділити основні принципи системного аналізу, які використовуються в ризик-менеджменті (рис. 1).

Комплексність	• врахування всіх можливих ризиків, що можуть вплинути на діяльність організації
Динамічність	• адаптація до змін у внутрішньому та зовнішньому середовищі
Взаємозв'язок ризиків	• аналіз взаємного впливу різних типів ризиків
Прогнозованість	• використання аналітичних моделей для прогнозування можливих ризиків
Гнучкість управління	• можливість оперативного реагування на нові загрози

Рис. 1. Основні принципи системного аналізу в ризик-менеджменті

Джерело: власна розробка

Етапи здійснення ризик-менеджменту на основі системного аналізу в цілому відповідають традиційному підходу, але є певні специфічні особливості, а саме:

- ідентифікація ризиків (виявлення потенційних загроз);
- оцінка та аналіз ризиків;
- моделювання та симуляція ризиків;
- розробка стратегій управління ризиками;
- моніторинг та коригування;
- управління комплексними та системними ризиками.

Оцінка та аналіз ризиків на основі системного підходу дозволяє оцінити взаємозв'язки та системні ефекти, тобто як один ризик може привести до нового ризику через взаємодію компонентів системи. В процесі моделювання та симуляції ризиків системний підхід дозволяє вивчити зміни в системі від зміни окремого компонента. Отже, такий підхід дозволяє враховувати потенційні та приховані ризики.

Основними перевагами використання системного підходу у ризик-менеджменті є такі: ідентифікація взаємозв'язків між ризиками, глибший аналіз компонентів системи, адаптивність та гнучкість [5].

В наукових дослідженнях виділяють багато моделей ризик-менеджменту: модель VAR, модель Монте Карло, аналіз дерева рішень, Байєсівські мережі, системна динаміка, LCA, ISO 27005, CVSS, метод критичного шляху та інші. В табл. 1 представимо порівняльний аналіз моделей ризик-менеджменту із системним підходом, які найчастіше зустрічаються.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз основних моделей ризик-менеджменту із системним підходом

Модель	Сладова системного аналізу	Основні принципи
ISO 31000	Взаємозв'язок ризиків, стратегічний підхід	Комплексний аналіз, інтеграція у систему управління
Байєсівська модель	Динамічне оновлення ризиків	Ймовірнісний аналіз, прогнозування змін
Монте-Карло	Імітаційне моделювання ризиків	Аналіз тисяч сценаріїв, пошук оптимальних рішень
Аналіз дерева рішень (ДТА)	Виявлення взаємозв'язків між альтернативами, оцінка ймовірних ризиків та можливих втрат.	Детермінованість альтернатив, очікувані значення, адаптивність рішення
Модель COSO ERM	Визначення ризикового апетиту, використання сценарного аналізу, SWOT, PESTEL	Інтеграція з корпоративною стратегією, орієнтація на досягнення цілей, відповідальність на всіх рівнях

Джерело: власна розробка

Вибір правильної структури управління ризиками залежить від конкретних потреб, цілей та контексту організації. Наприклад, ISO 31000 пропонує гнучкість і широке застосування, що робить дану модель придатною для різних організацій. Байєсівська модель об'єднує управління ризиками зі стратегічними цілями, ідеально підходячи для організацій, які прагнуть впровадити міркування про ризики у свої основні операції. Інші структури управління ризиками мають вузьку спрямованість. Структура управління ризиками Монте-Карло має структурований та кількісний підхід до ризиків інформаційної безпеки, тоді як Аналіз дерева рішень обслуговує управління ризиками на будівництві та в інфраструктурних проєктах.

Розуміння сильних сторін і фокусів кожної структури моделі дозволяє організаціям вибирати або комбінувати елементи з кількох структур для розробки надійної та адаптованої стратегії управління ризиками, дотримуючись принципів управління ризиками. Вчиняючи так, організації можуть краще орієнтуватися в невизначеності, захищати свої активи і досягати своїх стратегічних цілей. Ефективне управління ризиками необхідно для будь-якої організації, яка прагне досягти своєї мети.

Стандарт ISO 31000 покликаний допомогти організаціям застосовувати методичний підхід до управління ризиками, виконуючи такі три ключові дії [10]:

1. Виявлення ризиків.
2. Оцінка ймовірності виникнення події, пов'язаної із виявленим ризиком.
3. Визначення серйозності проблем, викликаних подією.

Таким чином, ISO 31000 не прагне усунути ризики, оскільки повне усунення всіх ризиків неможливе. Натомість він покликаний допомогти організаціям визначити свої ризики та розробити стратегію пом'якшення чи зниження ризиків, де це доречно.

Модель COSO ERM належить до корпоративної структури управління ризиками, розробленої COSO, щоб допомогти організаціям краще виявляти, оцінювати, керувати та контролювати ризики з погляду стратегії. COSO ERM інтегрує управління ризиками з більш широкими стратегічними цілями організації та управління продуктивністю [8]

Основні характеристики моделі COSO ERM включають:

- стратегічне узгодження: пов'язує принципи управління ризиками із стратегією та ефективністю організації;
- детальна структура: пропонує докладні рекомендації щодо управління, виявлення ризиків, оцінки, реагування та звітності;
- фокус на управлінні та культурі: підкреслює важливість структур управління та культури, що враховує ризики.

Байєсівська модель – це компактні та інтуїтивно зрозумілі графічні уявлення спільних розподілів ймовірностей (JPD), які можна використовувати для проведення причинно-наслідкового зв'язку та аналізу прогнозування ризиків, і вони мають ряд переваг у порівнянні з методами, заснованими на регресії [8]. Байєсовські мережі представляють собою інший підхід до прогнозування ризиків. Вони являють собою графічні уявлення, які набувають форми мережі, що складається з вузлів та ребер, представляють випадкові змінні моделі та впливи між ними відповідно. JPD факторизується в умовні розподіли ймовірностей, пов'язані з кожним вузлом, умовні для змінних, які безпосередньо на нього впливають. Обчислювальна ефективність моделі впливає з явного уявлення залежностей, що призводить до зменшення зв'язності у графі. Це призводить до більш компактних мереж і модель значно краще масштабується для великих систем або мереж, оскільки необхідно оцінити лише підмножину всіх можливих зв'язків.

Моделювання Монте-Карло дозволяє побачити всі можливі результати рішень та оцінити вплив ризику, що дозволяє приймати ефективніші рішення в умовах невизначеності. Моделювання Монте-Карло – це комп'ютеризований математичний метод, що дозволяє враховувати ризик у кількісному аналізі та прийнятті рішень. Вперше цей метод був використаний вченими, які працювали над атомною бомбою, і був названий на честь Монте-Карло, курортного міста Монако, відомого своїми казино [9].

У наукових та технічних галузях моделювання Монте-Карло використовується у багатьох процесах, починаючи від обчислювальної фізики до аеродинамічного проектування та моделей для прогнозування погоди. В галузі інжинірингу застосування варіюється від мікроелектроніки до проектування бездротових мереж, автономної робототехніки та систем штучного інтелекту. Екологічні компанії використовують моделювання для очищення, збереження та захисту дикої природи. Моделювання Монте-Карло відіграє значну роль у створенні фотореалістичних зображень віртуальних 3D-моделей із застосуванням у відеоіграх, архітектурі та кінематографічних спецефектах. Берегова охорона США використовує моделювання Монте-Карло для розрахунку можливого розташування жертв під час пошуково-рятувальних операцій.

Моделювання Монте-Карло виконує аналіз ризику, будуючи моделі можливих результатів, підставляючи діапазон значень – розподіл ймовірностей для будь-якого фактора, що має внутрішню невизначеність. Потім обчислюються результати знову і знову, кожного разу використовуючи інший набір випадкових значень із функцій ймовірності. Залежно від кількості невизначеностей та вказаних для них діапазонів, моделювання Монте-Карло може містити тисячі або десятки тисяч перерахунків, перш ніж воно буде завершено. Моделювання Монте-Карло створює розподіл можливих значень результатів [9].

Використовуючи розподіл ймовірностей, змінні можуть мати різні ймовірності виникнення різних результатів. Розподіли ймовірностей є набагато більш реалістичним способом опису невизначеності у змінних аналізу ризику.

Аналіз дерева рішень – спеціально розроблена модель для управління ризиками, яка дозволяє організаціям ефективно оцінювати та усувати потенційні ризики. По суті аналіз дерева рішень має на увазі побудову графічного уявлення, що нагадує деревоподібну структуру. Вона починається з вузла питання і розгалужується на різні шляхи прийняття рішень, зрештою призводячи до різних результатів. Кількісна оцінка ймовірностей та оцінка потенційних ризиків дозволяють особам, які приймають рішення, наочно подати наслідки свого вибору [8].

Ключові компоненти аналізу дерева рішень в управлінні ризиками включають:

1. Вузли: критичні точки, в яких робиться вибір, що веде до різних шляхів.
2. Гілки: ці шляхи, що виходять із вузлів прийняття рішень, ілюструють можливі дії чи вибори.
3. Результати: Кінцеві вузли відображають потенційні результати, що виникають у результаті рішень, ухвалених у вузлах прийняття рішень.
4. Ймовірність: ймовірності, присвоєні гілкам, кількісно визначають ймовірність конкретних результатів.
5. Очікувані значення: розраховуються шляхом множення ймовірностей на відповідні результати та є мірою потенційної цінності або ризику, пов'язаного з певним шляхом прийняття рішення.

Зі згаданих моделей ISO 31000 та COSO ERM є найбільш адаптованими та широко використовуються, пропонуючи структуровані підходи до управління ризиками і розробки ефективних відповідей на ризики. Порівнюючи рамки ISO 31000 і COSO ERM, бачимо, що обидві підкреслюють послідовні основні принципи управління ризиками. Ці принципи направляють організації у розробці, впровадженні та практиці процесів управління ризиками відповідно до їх конкретних потреб.

Реалізація системи управління ризиками у практичному аспекті часто стикається з проблематикою помилкових рішень, зумовлених наступними ключовими факторами: відсутність в організаційній ієрархії виділених фахівців або підрозділів, що спеціалізуються на ризик-менеджменті, а також нестача досвіду в управлінні ризиками на рівні менеджменту; обмеженість інформаційно-статистичних баз даних для ефективного ризик-менеджменту; неконсистентне застосування методологій оцінки різних видів ризиків, без урахування їх взаємодії та взаємовпливу

Висновки. В процесі дослідження встановлено, що застосування методу системного аналізу для управління ризиками є одним з найбільш значущих і йому має бути приділено більше уваги. Розглянуті моделі ризик-менеджменту із застосуванням принципу «декомпозиція – синтез» дозволять, з одного боку, визначити причинно-наслідковий ланцюг подій у запобіганні ризикам; з іншого – розглядати еволюцію підходів до управління ризиком не тільки в промислових, а й соціальних та природних середовищах.

Використання системного аналізу у ризик-менеджменті дозволяє структурувати, прогнозувати та мінімізувати ризики, враховуючи їхні взаємозв'язки та вплив на діяльність підприємства та будь-яку систему вцілому. Встановлено, що основними моделями ризик-менеджменту, які засновані на системному підході, є COSO ERM, ISO 31000, Байєсівська модель, Монте-Карло та аналіз дерева рішень. Виділивши основні їх принципи функціонування прийшли до висновку, що найбільш гнучкими та адаптивними є COSO ERM, ISO 31000.

Подальшого дослідження потребує використання моделей ризик-менеджменту на основі системного аналізу у інфраструктурних проєктах повоєнного відновлення, так як на даний час ця сфера є досить актуальною та маловивченою.

Список використаних джерел:

1. Венгер О. Філософія ризик-менеджменту у контексті глобальних викликів. *Lithuania Marijampolė, Marijampolės kolegija*. 2023. URL: <https://suduvosakademija.lt/wp-content/uploads/2023/09/> (дата звернення 23.03.2025)
2. Лобунець Т. В., Мединська Т. І., Рейкін В. С. Аналіз ризиків інноваційних проєктів в українському менеджменті та маркетингу: стратегічні аспекти. *Академічні візії*. № (28). 2024. URL: <https://academy-vision.org/index.php/av/article/view/897> (дата звернення 23.03.2025)

3. Пановик У. П. Системний підхід до управління ризиками інформаційної безпеки. Матеріали ІХ Всеукраїнської заочної науково – практичної конференції. Київ: УДУ імені Михайла Драгоманова, 2023. с. 198 URL: <https://sci.ldubgd.edu.ua/bitstream/123456789/12406/1/>(дата звернення 23.03.2025)
4. Скибінська З., Іщук Е. Формування моделі ризик-менеджменту у системі управління підприємством. *Економіка та суспільство*. 2024 (61). URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-61-123>(дата звернення 23.03.2025)
5. Скопенко Н. С. Методичні підходи до формування системи ризик-менеджменту. *Ефективна економіка*. 2023. № 2. URL: <https://doi.org/10.32702/2307-2105.2023.2.19> (дата звернення 23.03.2025)
6. Ткач С. В. Теоретичні засади оцінки ризиків у діяльності бізнес-структур. *Scientific notes of Lviv University of Business and Law*. №. 43. 2024. С. 106–113. URL: <https://nzlubp.org.ua/index.php/journal/article/view/1456>(дата звернення 23.03.2025)
7. Юдіна С., Мондрієвський С. Системний підхід до оцінки фінансових ризиків під час стратегічного управління. *Економіка та суспільство* 2024 № 1 (67). URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-67-54> (дата звернення 23.03.2025)
8. Enterprise Risk Management Frameworks and Models URL: <https://www.smartsheet.com/content/enterprise-risk-management> (дата звернення 23.03.2025)
9. Monte Carlo Simulation: What It Is, How It Works, History, 4 Key Steps <https://www.investopedia.com/terms/m/montecarlosimulation.asp> (дата звернення 23.03.2025)
10. The Basics of ISO 31000 – Risk Management <https://riskconnect.com/business-continuity-resilience/the-basics-of-iso-31000-risk-management/> (дата звернення 23.03.2025)

УДК 004.021; 004.043; 004.62

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.13>

Олена КОМІСАРЕНКО

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем і технологій, Національний транспортний університет, olenakomisarenko@ukr.net

ORCID: 0000-0002-7436-6473

Георгій БАРАНОВ

доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних систем і технологій, Національний транспортний університет, baranovgl2018@gmail.com

ORCID: 0000-0003-2494-8771

Дар'я МЕТЕЛЬСЬКА

аспірантка кафедри інформаційних систем і технологій, Національний транспортний університет, metelskadasha@gmail.com;

ORCID: 0009-0002-2804-3101

СПЕЦІАЛЬНА ТЕХНІКА КЕРУВАННЯ ДИНАМІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ РОЗВИТКУ ВИРОБНИЦТВА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ПРОДУКТІВ ЗА ПОТРЕБ СОЦІАЛЬНИХ ЖИТТЄВИХ ЦИКЛІВ

Анотація. Дана стаття представляє результати сучасного аналізу проблем розвитку інженерії організаційно-го управління спеціальними технічними засобами в умовах особливих операцій, що критично впливають на життєві цикли відповідних технологічно-природних регіонів.

Метою роботи є розвиток спеціальної техніки керування перехідними процесами в надзвичайних соціальних конфліктах та при екстремальних природних явищах щоб прийняти рішення на застосування процесів керування після ергатичного моделювання потокової складною динамічної системи на базі цифровізованих інформаційно-інтелектуальних технологій.

Методологія. Процеси спеціальної техніки керування починає розрахункова базова модель. Вона має типові програмні модулі. Алгоритми цілісно відображають реальні параметри зовнішніх збурень, загроз, завад та внутрішньо мережних взаємозалежних зв'язків між визначальними фрагментами об'єкта керування, що є цілями кожної проблемно ситуаційної задачі.

Результати. Оперативний синтез розрахункової базової моделі за вимог точного опису з'єднує специфічні функції наслідкового реагування елементів типових програмних модулів потокової складною динамічної системи та джерельні знання факторів розподіленого масштабного впливу зовнішнього навколишнього оточуючого середовища на проблемно ситуаційної задачі.

Наукова новизна. Така нова розрахункова базова модель забезпечує різні експерименти на математичних моделях. Інноваційний закон синергетичного управління процесами адекватно зображує реальні параметри: А – задані дослідником; В – надзвичайні атаки; С – чутливі об'єкти потокової складною динамічної системи; D – наслідки та оптимальні параметри гарантованого адаптивного управління.

Висновки. Досвід ергатичного моделювання та просторово-часової ситуаційної обізнаності (STSA) у тезаурусах визначає сутність, особливість, специфіку функціонування виробництва продуктів за потреб різноманіття процедур для запобігання руйнувань, аварій, катастроф (Vcas Vehicle Collision Avoidance System).

Ключові слова: інженерний контроль, динамічні системи, інтелектуальні технології, цифровізація.

Olena KOMISARENKO, Georhii BARANOV, Daria METELSKA. SPECIAL TECHNIQUE FOR MANAGING DYNAMIC PROCESSES OF DEVELOPMENT OF INTELLECTUAL PRODUCTS PRODUCTION ACCORDING TO THE NEEDS OF SOCIAL LIFE CYCLES

Abstract. This article presents the results of a modern analysis of the problems of development of organizational management engineering of special technical means in the conditions of special operations that critically affect the life cycles of the relevant technological and natural regions.

The purpose of the work is to develop a special technique for managing transitional processes in emergency social conflicts and extreme natural phenomena in order to make a decision on the use of control processes after ergatic modeling of a complex dynamic system based on digitalized information and intelligent technologies.

Methodology. The processes of special control technology are initiated by a computational base model. It has standard program modules. The algorithms holistically reflect the real parameters of external disturbances, threats, interference, and intra-network interdependent connections between the defining fragments of the control object, which are the goals of each problem-situational task.

Results. The operational synthesis of the computational basic model, according to the requirements of an accurate description, combines the specific functions of the consequential response of elements of typical program modules of a flow complex dynamic system and the source knowledge of the factors of the distributed large-scale influence of the external environment of the problem-situational task.

Scientific novelty. This new computational basic model enables various experiments on mathematical models. The innovative law of synergistic process control adequately represents real parameters: A – set by the researcher; B – emergency attacks; C – sensitive objects of a streaming complex dynamic system; D – consequences and optimal parameters of guaranteed adaptive control.

Conclusions. The experience of ergatic modeling and spatio-temporal situational awareness (STSA) in thesauri defines the essence, feature, specificity of the functioning of product production in the needs of a variety of procedures to prevent destruction, accidents, and disasters (Vcas Vehicle Collision Avoidance System).

Key words: engineering control, dynamic systems, intelligent technologies, digitalization.

Постановка проблеми. Відомі методи захисту життя і особливо за часовими подіями протягом кожної доби року постійно розвиваються та удосконалюються. Більшість інформаційних продуктів насамперед присвячено захисту телекомунікаційних мереж, каналів інтернет, операційних систем мобільних та стаціонарних комп'ютерів з різними файлами для обробки інформації. Такі методи [5, 7, 8] присвячені фізичним апаратним захистам, включаючи різні форми ключів, карток, паролей та організаційних заходів, обмежень доступу до конфіденційної авторської ідеї дієвого об'єкта (Авідо) [6], що надає власникам переваги над конкурентами у сучасних умовах глобального розподілу ринків для соціальних ЦІТ, інноваційних матеріалів, продуктів, товарів і послуг.

Спеціальна вузько призначена інженерія процесів захисту інформації стосовно інноваційних прогресивних спецтехнологій математичного моделювання об'єктів різних галузей людської діяльності залежить від програмно-апаратних комплексів (ПАК) й комплексних конструктивних матеріалів [2, 3, 5, 6, 9].

Аналіз сучасних досліджень і публікацій. Сучасні та особливо майбутні роки (2025-2030-2050) рр. подальшого розвитку виробництва інтелектуальних продуктів за потреб цифровізації життєвих циклів кожної людини. Особи з власним персональним різноманіттям дієвих привабливостей, в умовах особливих військових операцій та стратегічних реформ, які обумовлюють широкомасштабні прогностичні пошуки інженерних рішень організаційного управління. ЦІТ критично впливає на тенденції змін LC у відповідних ТПР високого скупчення активного населення.

Парадигмальність операційних, тактичних та стратегічних проектів і конкретних бюджетних програм їх реалізації цікава для соціуму й для агентів спеціальних служб. Тому, поліергатичні виробничі організації (ПЕВО) – лідери цифровізованих реформ і доведення Авідо до широкомасштабного впровадження та вітчизняний та міжнародні ринки згідно чинного законодавства кожної держави світу здійснюють розподіл інформаційних продуктів (рішень, директив, звітів, характеристик) на відкриті публічні та закриті конфіденційні спеціальні обмежені у наслідок чисельних хакерів, мисливців за Авідо інформаційні повідомлення.

Конкретна якість інженерних методів [1, 3, 4, 10] реалізації програмно-апаратних комплексів (ПАК), що вже зараз використовують користувачі комп'ютерних інформаційних технологій (КІТ), або їх можливо придбати за привабливими ринковими цінами за даними реклами у інтернет мережі, дуже часто замовчується самими розробниками. Вони добре розуміють парадигмальність та гнучкість лінгвістичних понять. Різні інтелектуальні агенти системи (ІАС) на початку ери цифровізації світової ноосфери не мають розумний практичний досвід.

Математична символічно-алгебраїчна форма опису за теорією множин завдяки фундаментальній абстракції лише стисло орієнтує призначення Авідо. Символьне скорочення шляхом характеристичної функції чи характеристичного рівняння PST дійсно орієнтує на певні [1 – 4, 10] конкретні методи. Окремо вони є у бібліотеці класифікованих інструментів за технологіями розв'язання інженерних задач практики ПЕВО. Наприклад, характеристична функція множини точок (математичний об'єкти ПСДС) D може бути Булева функція. Значення її дорівнює одиниці в точках множини ABCD. Але в інших точках, що не належать критеріям PST, і її значення нульові.

Постановка завдання. Інтерактивні взаємовідношення (імпорт ↔ експорт) між державних різних ПЕВО у багатомовних галузях знань напряду залежать від оптимізованого стандарту, регламенту, угод реалізації замовлень. Методи гарантування стійкості, чіткості, кожної одиниці слогана поняття вимагають однозначності актів дії особами, що приймають рішення. Спецконтроль також здійснюють технічними засобами автоматизації включно й роботів зі штучним інтелектом (AIR – artificial intelligence robot). В цілому динамічні ресурси ПАК не повинні допускати похибки й помилки у наслідок контрольованого вільного діалогу [2, 3, 5, 6, 9].

Виклад основного матеріалу. Майбутнє та сучасне призначення інтелектуальних агентів та виконавчих роботів автоматів полягає у максимізації цільових добутків від активізованих ресурсів з однозначною мінімізацією реально необхідних витрат: капіталів, матеріалів, енергії, часу процесорних режимів роботи техніки, технологічних засобів, інформаційних ПАК. Накопичена обізнаність знань у подібних режимах експлуатації часто фокусується на різних аспектах надзвичайних, загрозливих

подіях. Рішення негайного застосування іншої екстремальної спецтехніки керування завжди оцінюють (швидкоплинні, руйнівні, масштабні, непередбачувані РБМ у деталях) динамічні процеси за потреб VCAS-безпеки життя локального простору аварійних обставин.

Спочатку отримання сигналів SOS та адресації STC просторово-часових аварійних загроз центр управління подіями (ЦУП) даного класу активізує базисні програми. Відповідно до розуміння вхідної інформації ЦУП виконує процесорні дії та забезпечує їх регулювання у темпі розвитку подій. Область простору управління об'єднує три ключові зони: А1 – зовнішній стан соціального і природного оточуючого середовища на трасах ТПР, де рухається спецназ й технічні засоби; В2 – локальний внутрішній осередок екстремальних подій, де відбуваються наслідкові зміни; С3 – розподілені ергатичні спільні, різноманітні учасники, що потребують оперативної координації за потреб соціальних життєвих циклів. Ці програмні дії визначають підготовчий етап.

Ергатичне моделювання майбутніх варіантів розвитку надзвичайних ситуацій у єдиному просторово-часовому континуумі залежать від моделей, методів та наявних засобів. Результати повинні зменшити витрати та прискорити процеси відновлення життєдіяльності [1 – 3, 5, 6, 8, 9].

Процеси ергатичного моделювання. Взаємодії обох парадигмальних впливових явищ ПСДС ↔ ЗНОС базуються на стислих, абстрактних поняттях, наприклад, семантичні мережі. Теорія штучного інтелекту пропонує методологію операційних перетворень $G(B, Q)$ графів, як практичний аспект методу представлення знань, наприклад, сенсу зафіксованого діалогу інтелектуального агенту системи (ІАС) чи звіту даних моніторингового спостереження. Вершини, вузли B графа G характеризують ключові PST поняття, що відображають натурні (модельні) об'єкти, стани ситуацій, акти дії, складні комплексні R відношення. В той же час ребра, дуги (гілки) цього G графа, як парні $(q_{ij} \in Q)$ властивості спільного елементарного відношення $(r_{ij} \in q_{ij} \in R_{ij})$, відображають конкретний сенс повної контурності комунікації на різних рівнях ієрархічної (багатофрагментної) побудови NET мережі. Будь-яке врахування надзвичайних подій локального змісту потребує отримання без помилок і похибок реальних даних стосовно нових (непередбачених) умовних вузлів зони наслідків аварій.

Базові поняття спеціальних розподілених ергатичних середовищ

Серед провідних держав світу конкуренція між лідерами науково-техніко-технологічного прогресу сприяла не лише модифікації, модернізації, уніфікації товарів на міжнародних ринках. В першу чергу ініціювались винаходи принципово нових продуктів (інструментів, механізмів, агрегатів, машин комплексів, систем). Вони символізували нову форму розвитку людства. Масові потреби споживачів (агентів придбання нової продукції, що краща за традиційні, звичайні) формували нові структурні групи за інтересами та можливостями. Таким чином відбувалась піраміда стратифікації суспільства на п'ятірку конкретних розподілених ергатичні середовища PEC (Рис. 1). Спецтехніка для PEC відрізнялась за власних потреб від інших. З античних часів товарообіг для PEC визначав здатність купувати та експлуатувати нові продукти інформаційних технологій керування ПСДС.

У реально різноманітному єдиному просторі спільного життя громадян за ознакою PEC_i класифікаційний комплексний ієрархічний розподіл (Рис. 1) не претендує на принцип бажання «охопити природну сферу всіх взаємовпливів» $D \rightarrow D'$ стосовно всесвітньої економіки з ринками товарно-грошового обміну.

Діалогові сигнальні описи. Поняття « PEC_i » запропоновано лише для подальшого конструктивного означення сутності, особливості, специфіки функціонально парадигмальних взаємовідносин двох «принципів»: агент A_i має товар C та бажає продати за C_{K_a} ціну. Навпаки для власного споживання агент B_j за умов $C_{K_b} < C_{K_a}$ бажає купити цей C продукт.

Реальний торг обох представників PEC_A і PEC_B завжди відбувається результативно, якщо відносні ціни $\bar{C}_{K_b} \approx \bar{C}_{K_a}$, та дохід A_i від одиничного випадку $m_b \cdot \bar{C}_{K_b} \geq m_0 \cdot \bar{C}_{K_a}$ однозначно за пріоритетом капіталу забезпечує відносну прибутковість

$$\frac{m_b \cdot \bar{C}_{K_b} - m_0 \cdot \bar{C}_{K_a}}{C_{K_a}} = m_b \left(\frac{\bar{C}_{K_b}}{C_{K_a}} \right) - m_0 \left(\frac{\bar{C}_{K_a}}{C_{K_a}} \right) = \lambda_{ba} m_b - \lambda_a m_0 > 0.$$

Таким чином, відносна рівновага маси $m_b = m_0$ проданого за меню A та придбаного товару (об'єм, поверхня, інший очевидні показники привабливості) задовольнила B_j споживача. Неявна, опосередкована інформація продавця A_i , що за відношення λ_{ba} зрівноважила (умовно-еквівалентну, але не покупку) масу m_0 та добуток $\lambda_a m_0$. Тому, згідно чинного законодавства та ринкових правил агент A_i отримав прибуток з урахуванням податкових відсотків, особливо коли ціни на спецтехніку реально зростають.

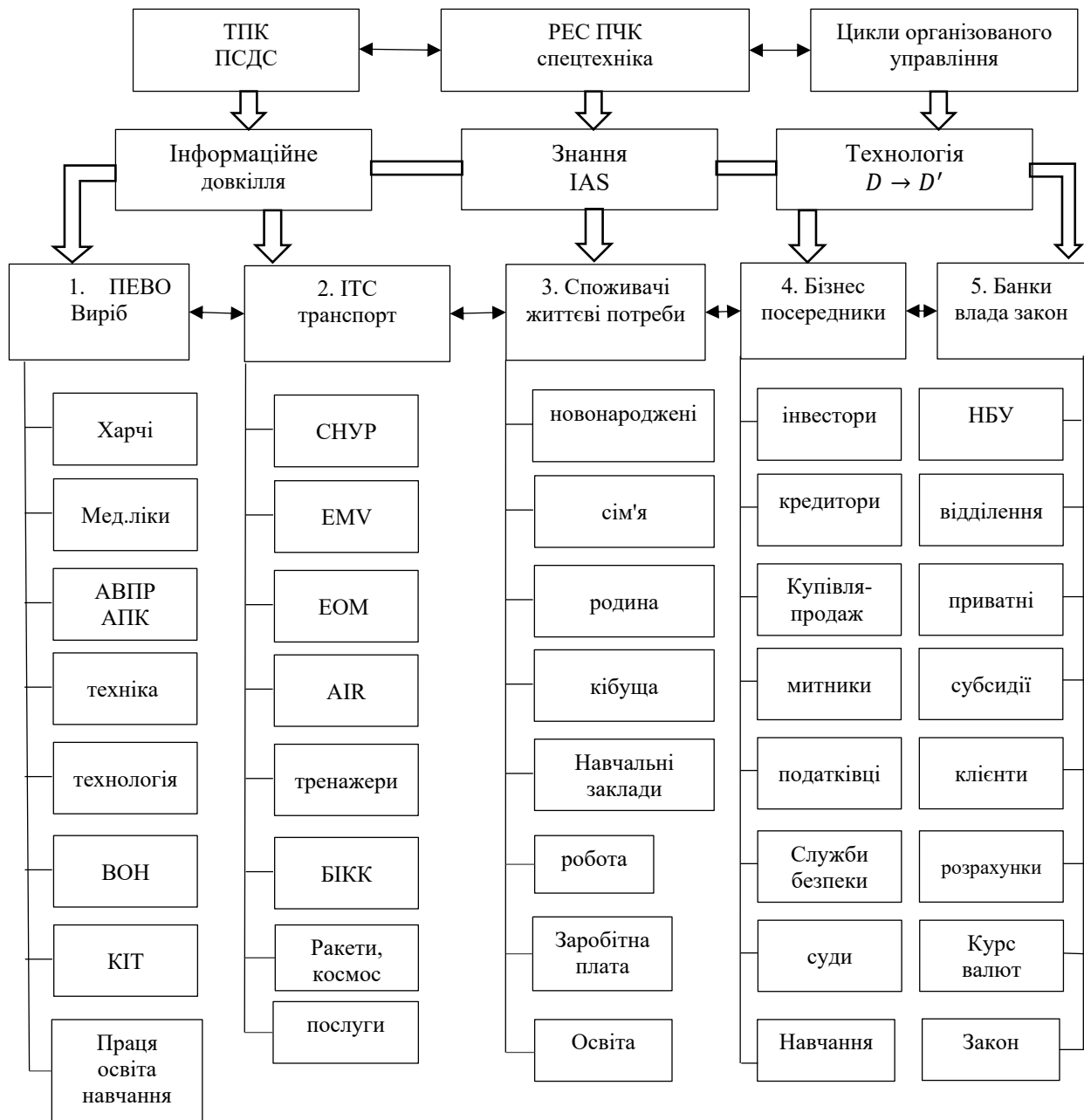


Рис. 1. Концепція стратифікації людства на п'ятірку взаємозалежних РЕС з індивідуальною організаційною ієрархією

Даний простий приклад ефективної бізнес технології визначає, що поняття «інформація» має різні категорії сутності, особливості, специфіки функціонування спецтехніки ПСДС сигнального повідомлення РЕС між двома A_i комунікатор-передавач, а B_j комунікатор-отримувач дохід LC розвитку ІАС й ПЕВО.

Діалогові сигнальні описи (модельні зображення лінгвістичною мовою спілкування) одночасно лише у просторово-часовому континуумі двох реальних $A_i \cap B_j$ оригіналів по-різному був факт керування динамічним процесом. Матеріальний (фізико-хімічний, біологічний, валютний) обмін та застосування спецтехніки. У фокусі торгу характеризував лише ціни умовної маси (наприклад, 1 кг, 1 л, одиниця товару LC). Але у залежності від капіталу в гаманці споживача B_j він купив не рекламний товар, а іншу меншу $m_0 = m_b$ масу, упаковку. Пріоритету спрощеного прискореного оформлення згода (потреб й вимог).

Таким чином, конкретний обсяг добутку $\lambda_a m_b$ у вигляді грошей перейшли до A_i продавця згідно збільшення (накопичування) прибутку за його плану продати всім хто спроможний сплатити за спецпослуги [4, 10].

Ключова роль поняття «інформація» (Рис. 2) потребує для задач практики ефективного тлумачення за темою бізнес технологій за замовленнями в умовах ризиків, невизначеності поточного та стаціонарного ринку.

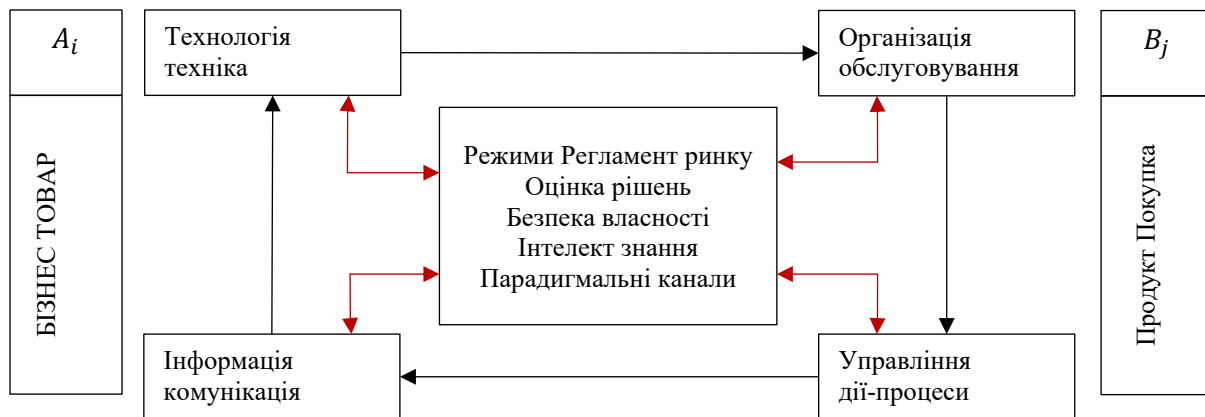


Рис. 2. Концепція системо-технічних та інформаційно-комунікаційних циклів взаємовідносин за парадигмальною $A_i \leftrightarrow B_j$ згодою та потребами соціального життя

Базові поняття життєвих циклів (Рис. 2) застосовують в різних сферах ергатичної діяльності кожної людини, поліергатичної виробничої організації. PEC та в цілому цивілізована ноосфера унаслідок множинного різноманіття їх, потребують зрозумілого узагальнення визначення термінів (Рис. 2) інваріантів колообігу.

Інформація (латинське роз'яснення, тлумачення, висловлення) сфера семіотики. Інформація розвитку «закодована в яйці, як інформація; робить можливим розвиток зародку згідно з властивостями, притаманними даному виду» [3-4].

Інформація, це взаємозалежність в сучасних глобалізованих ринках різноманітної конкуренції буття разом всесвіту та цивілізацій (Рис. 3). Мовні форми змінюються та впливають на наступні взаємовідношення у всіх просторово-часових континуумах. Сенс понять розподіляють та з'єднують PEC завдяки матеріальним носіям коду в залежності від їх реального впливу на координаті емергентності об'єктів локальної взаємодії у кожному ТПР.

Базова природна взаємозалежність між фазами безпечно-звичайного життя та не життя («всі люди – смертні» Сократ до нашої ери) завжди визначала ефективність гармонії життєвих об'єктів (Рис. 3) з квазіперіодичними стохастичними, але циклічними коливаннями довкілля, яке дійсно незалежне, неохоплене, невизначене, різноманітне та неперервно змінюється.

Парадигмальні стани факторів впливу всесвіту кожену добу року поточного часу обумовили означення (максимум та мінімум) відносних тенденцій зростання (наближення до максимуму апогея) чи зменшення (спадання до перегиба чи ухилення від максимуму). Знання чи генетична обізнаність, що гарантують життєздатність (закодована в яйці клітинах, як органогенез та метаболізм) флори, фауни, людини, народу, суспільства [3-4].

Принципова сутність природної невизначеності мовної, жаргонної (багатозначності, цілісної синонімії слів) інформації між парами клієнтів сучасного ринку потребує створення умов забезпечення стійкості при мовному, за темою використання символічних означень. Реальна динамічність бізнесу та ринку техногенно-природного комплексу, відкритість до факторів впливу зовнішнього оточуючого середовища (ЗНОС), множинність варіацій продукції (дивись меню сучасні каталоги) вимагає умов згоди на товарообмін та певні організаційні зусилля.

Експеримент. Організація (французьке – організую, повідомляю) створює комфортні привабливі умови для спілкування A_i та B_j учасників бізнесу. Організація (за даною темою дослідження Рис. 4) – це форма упорядкування просторового розміщення об'єктів і допоміжних інструментів (засобів). ПЕВО сприятна забезпечувати масове обслуговування всіх LC часового інтервалу потрібного (лише того, що треба) для можливих споживачів. Наслідки ефективної швидкої взаємодії обумовлюють легкість, гнучкість, парадигмальність результативного ефекту керування процесами застосування спецтехніки за згодою.

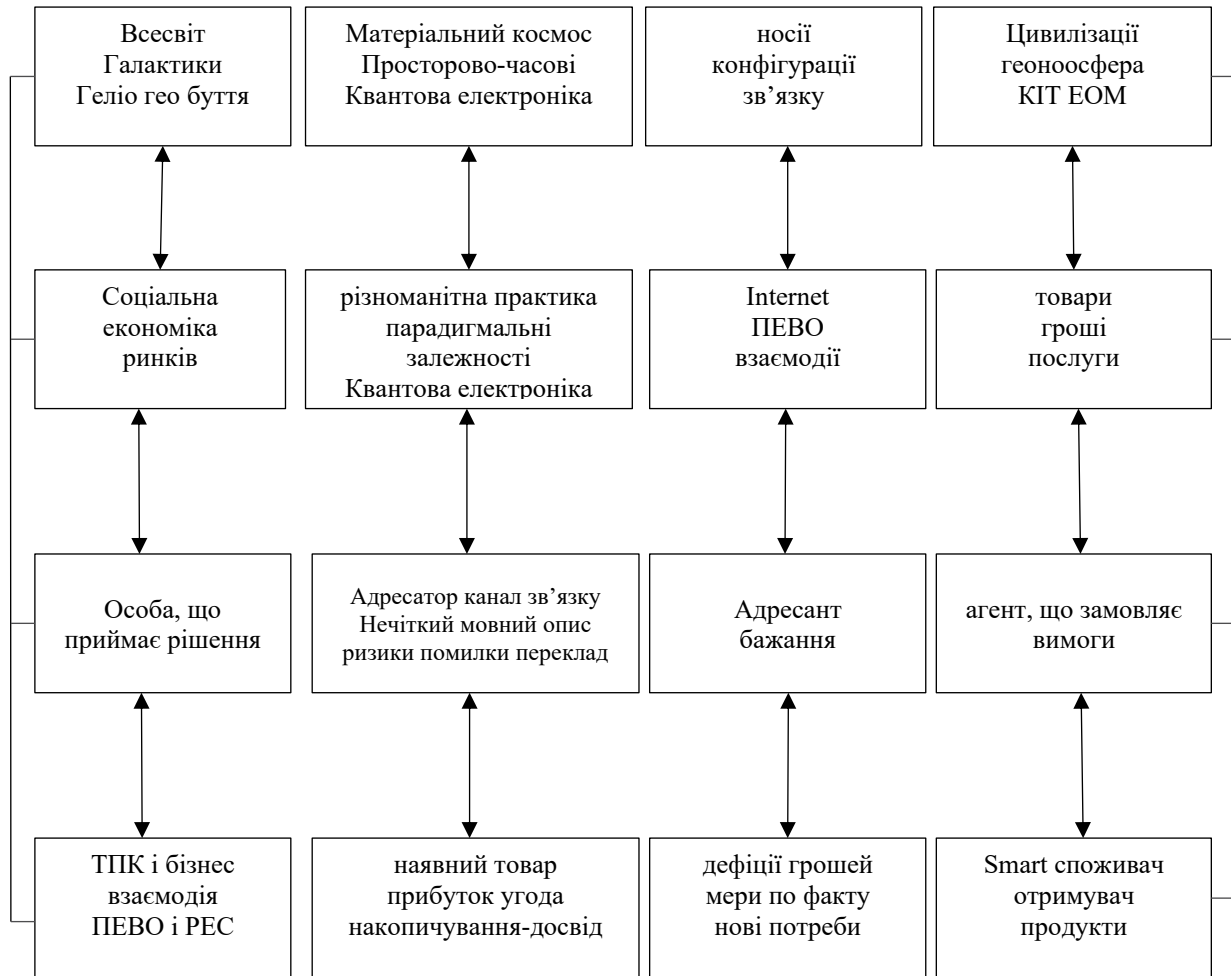


Рис. 3. Схематизація поняття «інформація», як інтегрованих форм визначальних циклів взаємозалежностей координації та емергентності

Тобто означена на (Рис. 4) протидія хаосу, хакерам, шахраям та погодно-кліматичним збуренням без «організації» бізнесу неможлива.

Собівартість, що на прилавках продавця визначається, як ринкова ціна для споживача товарної продукції від виробника та постачальника на локальні ринки кожного техногенно природного комплексу формує базовий рівень ціноутворення платних послуг вздовж ланцюга керування процесами.

Тому власники поліергатичних виробничих організацій зацікавлені у науково-технічному прогресі (механізація, електрифікація, організація поточкових мереж, автоматизація, комп'ютеризація, цифровізація).

Нова продуктивна основа завдяки техніці, технології, інженерії (Рис. 5) при раціоналізації інформації та організації забезпечує мінімізацію витрат енергоресурсів та сировини, а також максимізацію ефективної прибутковості за рахунок підвищення масової продуктивності технологічного конвейєра.

Технологія (грецьке – мистецтво, майстерність, талант) організовує послідовне, паралельне, мережні потоки між вузловими станами покрокового інтегрованого (Рис. 5) вибору кінцевого цільового продукту.

З античних часів поняття «управління» та й зараз на майбутні 2025-2050 років нашої ери характеризує множину різноманіття конкретних реальних форм людино-машинних з'єднань (типу НМІ Рис. 6) у поліергатичних виробничих організаціях (ПЕВО) різних галузей людської діяльності ієрархічного суспільства.

Фундаментальна інваріантна сутність, особливість, специфіка функціонування сучасних та майбутніх засобів гарантовано адаптивного управління (ГАУ), як об'єкт проектування, випробування, сертифікації, виробництва, навчання операторів типу НМІ, експлуатації, подальшого розвитку API (функціоналів точності, якості, ефективності, безпеки) поки що (Рис. 6) незмінна.

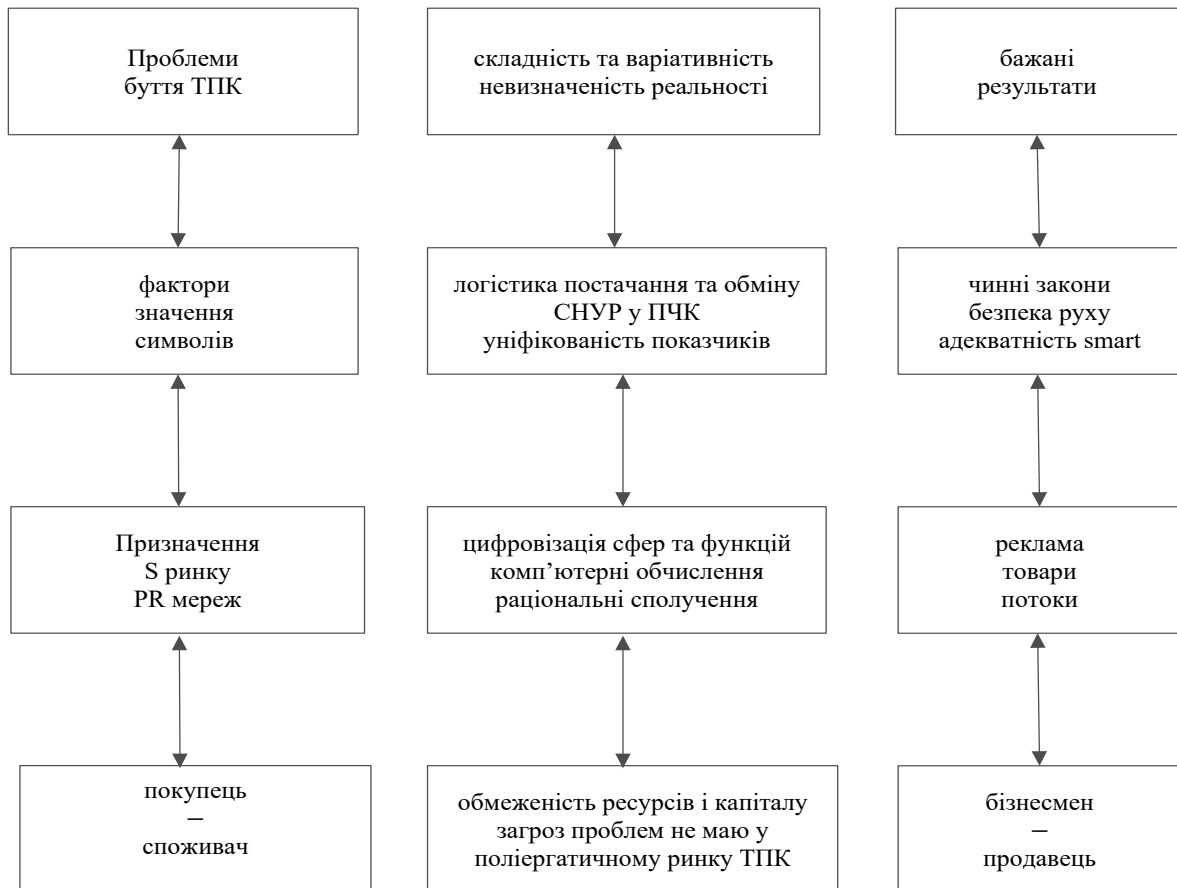


Рис. 4. Модельне поняття спецринку, як уявлення сутності «організація» поліергатичного техногенно-природного комплексу

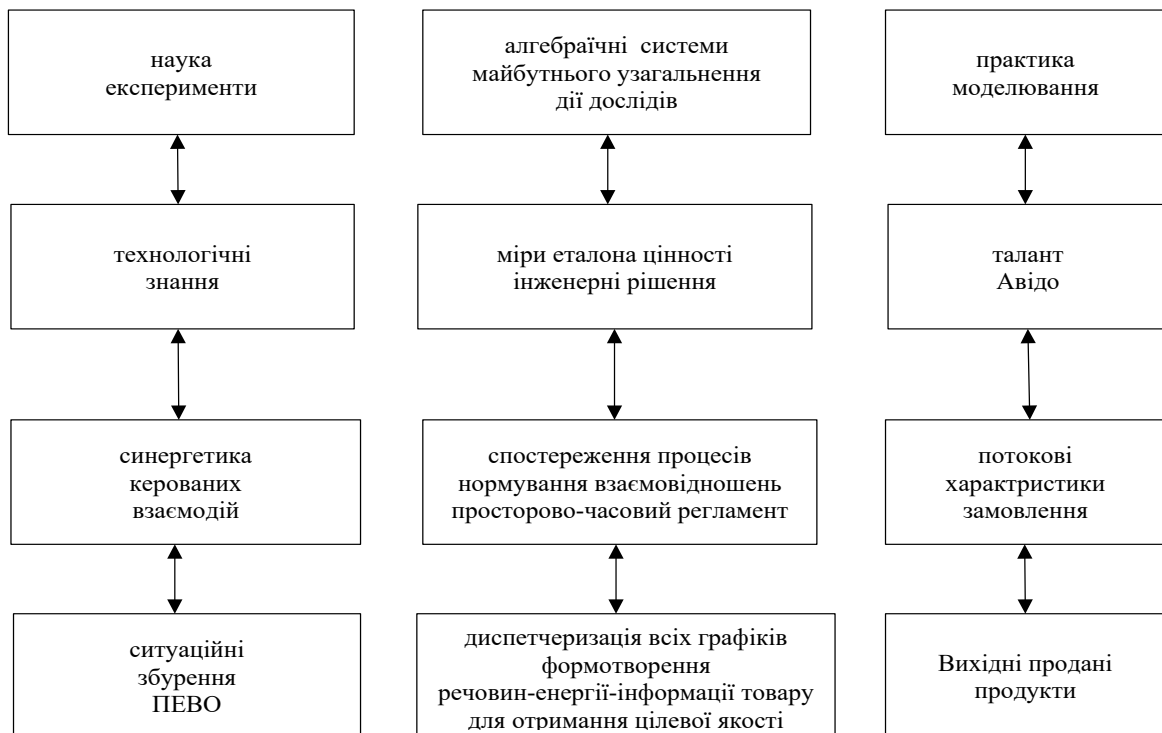


Рис. 5. Поняття «технологія» поточкових складних динамічних виробництв продукції з синергетичними якостями для LC

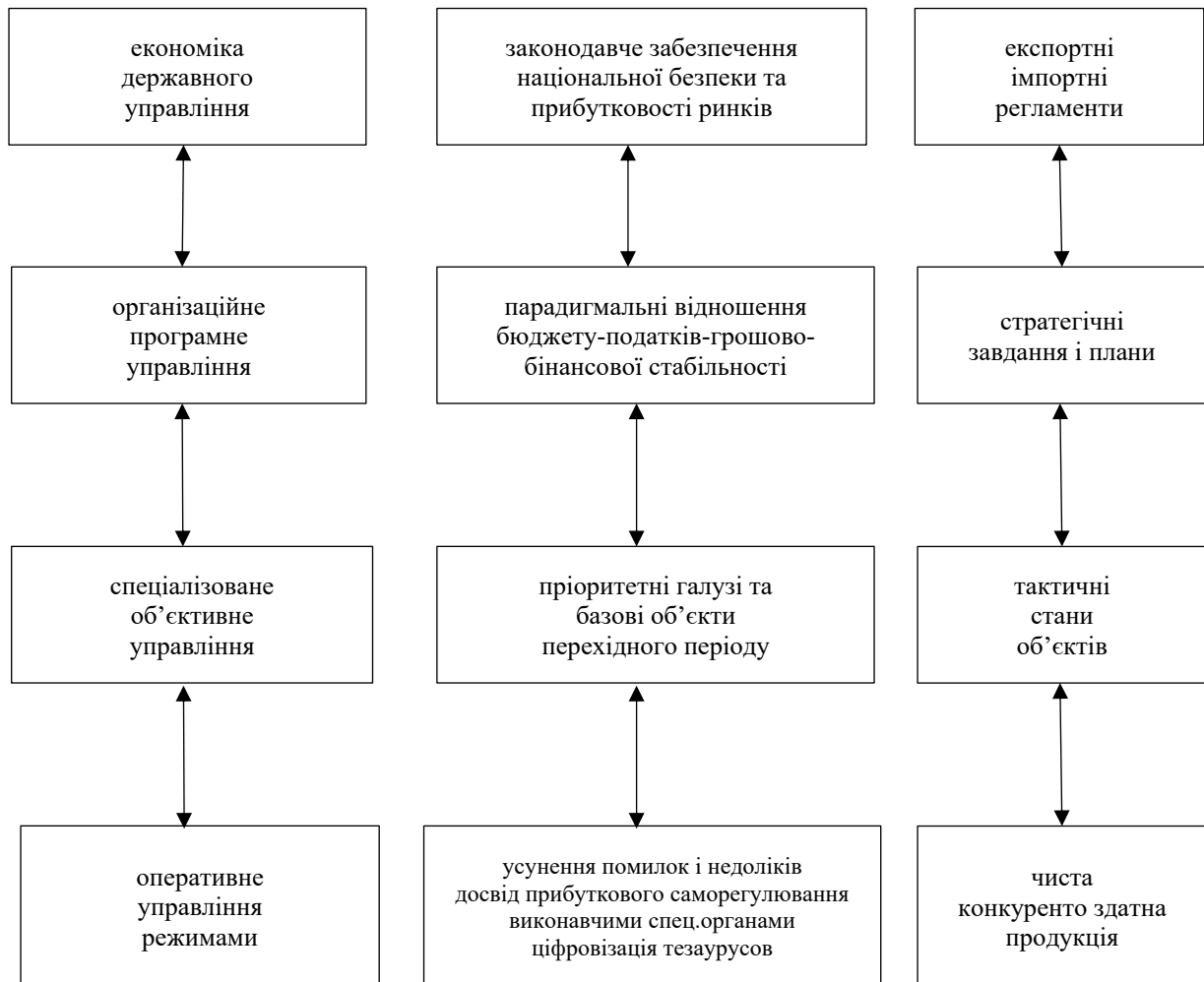


Рис. 6. Поняття ієрархічного багатоаспектного «управління» макроекономік українського виробництва продуктів в умовах

Управління – це потоковий складний динамічний синтез у межах кожної цілісної системи з ієрархічними рівнями (наприклад: мега-, мета-, макро-, міні-, нано- тощо) будь-якої природи, що у конкретних умовах функціонування незалежного всесвіту реагує на фактори впливу довкілля ЗНОС. Закон управління розпізнає та приймає рішення (що робити, де, коли, яким чином, навіщо, за яким законом витрат енергоресурсних запасів, на яких траєкторіях та видах режимів маневрування). На виконавчому етапі виконавчі органи (Рис. 6) реалізують цільові комплексні програми застосовує завдання ЦУП на повний життєвий цикл.

Результати експерименту. За потреб прогнозних рішень стосовно підвищення бізнес ефекту у ринкових умовах невизначеності зробимо стислий висновок щодо подальшого застосування базових визначень та спецтехніки.

Інтегрована концепція (Рис. 1 та Рис. 2) спрямовує парадигмальні відношення чотирьох понять за фазою згоди для спільних потреб життя в умовах глобалізації. Поняття інформації (Рис. 3) взаємокомунікацій двох об'єктів існує завдяки діалоговим матеріальним носіям коду символів та сигналів.

Поняття організація (Рис. 4) просторово-часових форм двох НМІ здатна протидіяти хаосу (конфронтації, непорозумінню, збуренням) для масового обслуговування ЛС керування засобами спецтехніки.

Поняття технологія (Рис. 5) спрямоване на прискорення процесів та агентів раціонального (міні-максного) виробництва нових інтелектуальних продуктів згідно інженерно-технічних способів обслуговування для досягнення показників якості подібних бажанню кожного споживача.

Поняття управління (Рис. 6) інтегровано, специфічно та логічно зв'язує послідовний чотирикутний квадрат синтезу кожної складової на новій проектній площині. Попередні, почергові кроки аналізу (декомпозиції, розподілу, розгалуження, означення сутності, особливості, специфіки функціонування часток) дійсно параметризували ключові моделі повної РБМ у R^4 простір буття спецтехніки ПСДС.

Таким чином парадигмальні антиподні, матеріальні об'єкти взаємовідношень індивідуально реагують на фактори збурень, загроз, завад довкілля. Навпаки інші необхідні й достатні засоби гарантованого адаптивного управління (ГАУ Рис. 7) генерують, виробляють пропонують ефективні режими функціональних перехідних процесів. Достовірні закони (мови, символів і сигналів) тоді забезпечують адаптацію в умовах фактичних ризиків і невизначеності багатоглибкого грошово-фінансових транзакцій за суспільних потреб.

Концептуальна подібність всіх структур (Рис. 1-6), які мають по три паралельні градації та елементарні атоми дозволяє за цілими числами оцінити запропоновану складність у вигляді добутку (Рис. 7).

$$S = \{(4 * 3) * 4\} * 2 = 96,$$

де множник 2 праворуч означає парність A_i та B_j потоків капіталу й товару за ринковими законами, що на (Рис. 7) парадигмально обмежені.

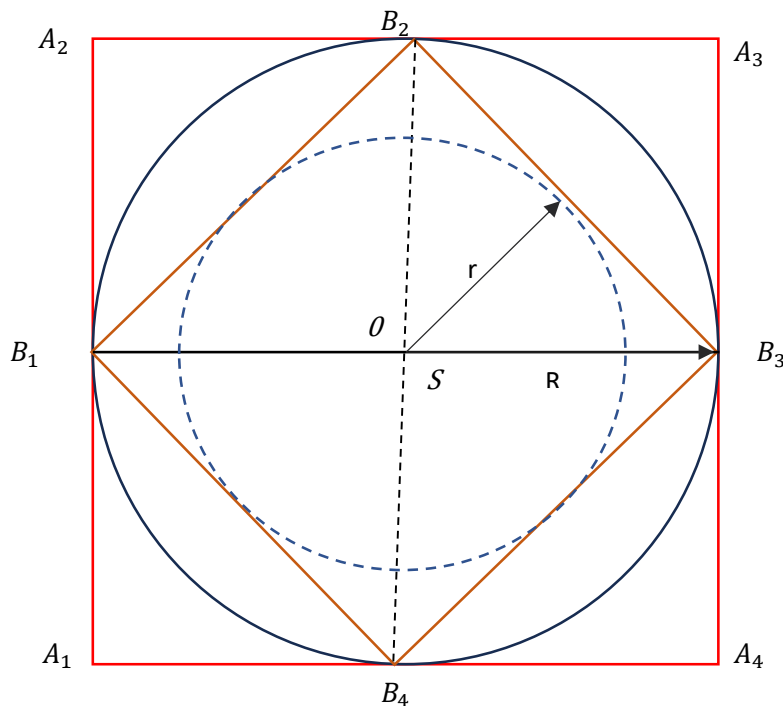


Рис. 7. Квадратні та колові зображення обмежень за ринкових цін на товари та послуги спецтехніки

Надамо складові, що регулюють оцінювальні функції привабливості коаліційної згоди, як реально діяти

Бізнес:

Сфера: $A_1A_2 = A_2A_3 = A_3A_4 = A_4A_1 = D = 2R = a$.

Сфера споживачів: $B_1B_2 = B_2B_3 = B_3B_4 = B_4B_1 = \sqrt{2}R = D$.

Коаліційна згода: $B_j \in (A_j, B_j, A_{j+1}), \forall j = 1, 2, 3; a = 2\sqrt{2}r = 2R$.

Власна само імпорт поліергатичної виробничої організації (ПЕВО).

Примирима згода: $ПЕВО \in (A_4B_4A_i), \forall i = 1, 4, r < R = \sqrt{2}r$.

Приклади самоорганізації для власних потреб:

B_4 – сам продає квартиру в умовах податків;

A_4 – НБУ сам для себе купує потрібні продукти, товари, послуги валюту.

На (Рис. 7) відображена ЦУП з топологічними елементами для квадратних проєкцій площини. Проблемні ситуаційні задачі згідно (1) – (4) закономірностей розв'язує спеціальна техніка цифровізованого управління.

Висновки. В роботі означені засоби спецтехніки керування для поліергатичних виробничих організацій, що згідно теоретичних основ цифровізації дозволили сформувати наступне: 1. Прогресивні поліергатичні виробничі організації майбутнього потребують інноваційних засобів діалогового

узгодження інформаційних розподілених продуктів систем з новими характеристиками їх актуального функціонування. 2. Інноваційні методи та засоби програмно-апаратних комплексів залежать від результатів функціонування діалогових сфер узгодження умов існування продуктів. 3. Подальший розвиток глобального інформаційного середовища створюють нові засоби цифровізації потокових складних динамічних систем з урахуванням мультиагентних інтелектуальних взаємодій, на базі інноваційних засобів спецтехніки.

Список використаних джерел:

1. Дмитриченко М. Ф. Використання концепції ефективного автомобіля для моделювання динаміки транспортних потоків у вуличній мережі міста. *Економіка та управління на транспорті*. 2016. С. 3–8
2. Голощак А. М. Господарська діяльність в умовах дії спеціальних режимів господарювання в умовах воєнного стану. Європейські орієнтири розвитку України в умовах війни та глобальних викликів XXI століття: синергія наукових, освітніх та технологічних рішень : у 2 т. : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Одеса, 19 травня 2023 р.) / за загальною редакцією С. В. Ківалова. Одеса : Видавництво «Юридика», 2023. Т. 2. С. 704–707. <https://em.duit.in.ua/index.php/home/article/view/131>
3. Комісаренко О. С. Інформаційне моделювання процесів створення функціональних матеріалів : дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.13.06 – інформаційні технології / Комісаренко Олена Сергіївна. К. : НТУ, 2020. 283 с.
4. Комісаренко О. С. Цифровізовані інформаційно інтелектуальні технології розв'язку інженерних задач / О.С. Комісаренко, Г.Л. Баранов, О.К. Войденко, Д.В. Метельська. Прикладні інформаційні системи та технології в цифровому суспільстві: зб. тез доповідей і наук. повідомл. учасників VIII Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 01 жовтня 2024 р.) К.: Київський нац. ун-т ім. Тараса Шевченка, 2024. с. 196-206.
5. Ткачук А. Г., Безвесільна О. М., Гуменюк А. А., Янчук В. М., Крижанівська І. В. Дослідження основних напрямків розвитку сучасних системи стабілізації озброєння. Науковий журнал «Технічна інженерія». 2020. Вип. 2 (86). С. 73–80.
6. Цифрова трансформація (цифровізація) регіонів України: аналіт. зап. Національна академія державного управління при Президентові України. URL: <http://academy.gov.ua/pages/dop/198/files/4ba4c1b4-cefe4f27-b58b-3aee7c8cf152.pdf>
7. Шевченко О. Л., Стрілець А. Ю. Цифровізація бізнес-процесів під час війни // Бізнес, інновації, менеджмент: проблеми та перспективи : збірник тез та доповідей III Міжнародної науково-практичної конференції, м. Київ, 08 грудня 2022 р. Київ, 2022. С. 246–247.
8. Шкляр В., Петухов А. Роль цифрових технологій в управлінні зовнішньоекономічною діяльністю підприємств. Управління та адміністрування в умовах протидії гібридним загрозам національній безпеці : матеріали Міжнар. наук. практ. конф. м. Київ, 22 листоп. 2022 р. Київ, 2022. С. 232–235.
9. Ministry of Digital Transformation of Ukraine (2023), Digital Literacy Research – 2023, https://osvita.dii.gov.ua/uploads/1/8801-en_cifrova_gramotnist_naselenna_ukraini_2023.pdf.
10. Serhii Yevseiev, Oleksandr Milov, Yurii Pribyliev, Nataliia Zviertseva, Aleksandr Lezik, Olena Komisarenko, Andrii Nalyvaiko, Volodymyr Pogorelov, Vitaliy Katsalap, Iryna Husarova. Development of the concept for determining the level of critical business processes security. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* T.1. Вип. 9. – 2023 с. 21-40. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.274301.

УДК 004.72:63.018

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.14>

Олексій КРИШАН

кандидат економічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій, Придніпровський інститут ПрАТ «ВНЗ «Міжрегіональна Академія управління персоналом», krishan@ki-maup.com.ua

ORCID: 0000-0002-2967-0126

Олександр КОРЕНЬ

кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій, Придніпровський інститут ПрАТ «ВНЗ «Міжрегіональна Академія управління персоналом», koren@ki-maup.com.ua

ORCID: 0000-0002-7406-7400

Всеволод БУДНІКОВ

кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій, Придніпровський інститут ПрАТ «ВНЗ «Міжрегіональна Академія управління персоналом», budnikov@ki-maup.com.ua

ORCID: 0009-0008-9862-4562

Вікторія БИВШЕВА

старший викладач кафедри економічного проектування та маркетингу, Придніпровський інститут ПрАТ «ВНЗ «Міжрегіональна Академія управління персоналом», byvsheva@ki-maup.com.ua

ORCID: 0009-0000-1723-4813

Данило ШВЕД

аспірант кафедри інформаційних систем та мереж, Національний університет «Львівська політехніка», danylo.r.shved@lpnu.ua

ORCID: 0009-0005-4306-6805

**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ПЛАТФОРМА ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ
АГРОПРОМИСЛОВОЮ ЕКОНОМІКОЮ НА ОСНОВІ CALS-ТЕХНОЛОГІЙ**

Анотація. Мета дослідження. Розробка інтелектуальної платформи для оптимізації управління агропромисловою економікою, яка базується на CALS-технологіях та інтегрує сучасні підходи до автоматизації збору, обробки та аналізу даних. Дослідження спрямоване на створення системи, що забезпечує оперативне прогнозування виробничих процесів, оптимізацію управлінських рішень та адаптацію до швидкозмінних ринкових умов, що є актуальним завданням у контексті цифрової трансформації аграрного сектора.

Методологія. У дослідженні застосовано комплексний підхід, що включає математичне моделювання динаміки системи за допомогою диференціальних рівнянь, розробку експертного модуля з прогнозування на базі штучних нейронних мереж та розробку алгоритмів оптимізації управлінських рішень. Архітектура платформи включає інтегроване управління даними, модуль налаштування під специфічні умови господарств та блок підтримки прийняття рішень, що забезпечує циклічну адаптацію системи до зовнішніх та внутрішніх впливів.

Наукова новизна. Запропоновано новий підхід до управління агропромисловою економікою, що ґрунтується на синергії CALS-технологій із сучасними інформаційними системами. Розроблена математична модель дозволяє не лише прогнозувати зміни ключових показників (виробництво, якість продукції, ринковий попит), але й коригувати управлінські рішення в режимі реального часу. Інноваційність платформи полягає у використанні гібридних методів аналізу даних та інтеграції алгоритмів машинного навчання для підтримки прийняття оптимальних рішень.

Висновки. Отримані результати демонструють ефективність застосування розробленої платформи, що дозволяє адаптивно реагувати на зміни ринкових умов та підвищувати конкурентоспроможність агропромислових підприємств. Чисельне моделювання підтвердило можливість оптимізації виробничих процесів через циклічну корекцію інвестицій, що позитивно впливає на обсяг виробництва, якість продукції та рівень ринкового попиту. Запропонована система має високий потенціал для практичного впровадження в аграрному секторі, а також відкриває перспективи подальших досліджень у сфері цифровізації управління економічними процесами.

Ключові слова: інтелектуальна платформа, агропромислове управління, CALS-технології, диференціальні рівняння, нейронні мережі, цифрова трансформація, оптимізація виробництва.

Oleksii KRYSHAN, Oleksandr KOREN, Vsevolod BUDNIKOV, Viktoriya Byvsheva, Danylo SHVED.
INTELLIGENT PLATFORM FOR OPTIMIZING MANAGEMENT OF AGRO-INDUSTRIAL ECONOMY BASED ON CALS TECHNOLOGIES

Abstract. Research objective. Development of an intelligent platform for optimizing the management of the agro-industrial economy, which is based on CALS technologies and integrates modern approaches to the automation of data collection, processing and analysis. The research is aimed at creating a system that provides operational forecasting of

production processes, optimization of management decisions and adaptation to rapidly changing market conditions, which is a relevant task in the context of the digital transformation of the agricultural sector.

Methodology. The research used a comprehensive approach, including mathematical modeling of system dynamics using differential equations, development of an expert forecasting module based on artificial neural networks, and development of algorithms for optimizing management decisions. The platform architecture includes integrated data management, a configuration module for specific farm conditions, and a decision support unit that ensures cyclic adaptation of the system to external and internal influences.

Scientific novelty. A new approach to managing the agro-industrial economy is proposed, based on the synergy of CALS technologies with modern information systems. The developed mathematical model allows not only to predict changes in key indicators (production, product quality, market demand), but also to adjust management decisions in real time. The innovation of the platform lies in the use of hybrid methods of data analysis and the integration of machine learning algorithms to support optimal decision-making.

Conclusions. The results obtained demonstrate the effectiveness of the developed platform, which allows adaptively responding to changes in market conditions and increasing the competitiveness of agro-industrial enterprises. Numerical modeling confirmed the possibility of optimizing production processes through cyclical adjustment of investments, which positively affects the volume of production, product quality and the level of market demand. The proposed system has high potential for practical implementation in the agricultural sector, and also opens up prospects for further research in the field of digitalization of economic process management.

Key words: intellectual platform, agro-industrial management, CALS technologies, differential equations, neural networks, digital transformation, production optimization.

Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. У сучасних умовах агропромисловий комплекс переживає стрімкі трансформації, що спричинені інтеграцією цифрових технологій та зростаючою конкуренцією на внутрішньому та міжнародному ринках [1]. Інтелектуальна платформа, заснована на CALS-технологіях [2], відкриває нові можливості для оптимізації управлінських процесів, що дозволяє більш ефективно реагувати на зміни економічного середовища та потреби ринку.

Проблематика даного дослідження зосереджена на необхідності створення єдиної інтелектуальної платформи, здатної об'єднати сучасні CALS-технології для вирішення ключових управлінських завдань в агропромисловій сфері. Традиційні підходи, наприклад, [2], до управління стають все менш ефективними у зв'язку з динамічними змінами технологічного ландшафту, тому існує гостра потреба у впровадженні систем, що здатні забезпечити адаптивність, прогнозування та оперативне реагування на зовнішні та внутрішні виклики.

Зв'язок даної проблематики із сучасними науковими та практичними завданнями [3, 4] полягає у формуванні нових підходів до цифровізації економіки агропромислового комплексу, що можуть слугувати моделлю для інших галузей. Впровадження CALS-технологій у комплексне управління сприятиме підвищенню ефективності виробництва, зниженню витрат та збільшенню конкурентоспроможності підприємств, що має стратегічне значення для розвитку аграрного сектору в умовах глобальної економічної нестабільності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження у сфері цифровізації агропромислового комплексу свідчать про активну інтеграцію сучасних технологій управління даними, автоматизації виробничих процесів та аналітичних інструментів для підвищення ефективності підприємств [5]. Наукові публікації акцентують увагу на ролі інформаційних систем у створенні умов для прийняття оперативних управлінських рішень, проте часто не враховують специфіку аграрного сектора, де вплив зовнішніх факторів є надзвичайно значущим [6].

Дослідники [7] відзначають, що традиційні методи управління в агропромисловому комплексі не відповідають сучасним вимогам, пов'язаним із зростанням обсягів даних та необхідністю їхньої швидкої обробки. Останні публікації підкреслюють потенціал CALS-технологій як інструменту для інтеграції процесів планування, виробництва, логістики та контролю якості. Проте існує потреба в системному підході, який би об'єднав усі елементи управлінського ланцюга в єдину платформу.

Аналіз літератури свідчить про те, що окремі аспекти CALS-технологій вже успішно впроваджуються у виробничих процесах, але інтеграція цих технологій у єдину інтелектуальну платформу залишається недостатньо дослідженою [8]. Багато робіт зосереджено на технічних рішеннях окремих модулів, не розглядаючи комплексну синергію між ними, що може забезпечити більш ефективне управління всіма етапами виробництва та постачання продукції.

Ще одна нерозкритна проблема полягає в оптимізації алгоритмів обробки даних та прийняття рішень на основі великих обсягів інформації. Більшість досліджень не пропонують ефективних моделей для інтеграції традиційних підходів з сучасними інтелектуальними системами, що обмежує можливість прогнозування та своєчасного реагування на змінні умови ринку.

Крім того, актуальним залишається питання забезпечення сумісності між різними інформаційними системами та протоколами обміну даними. Це створює перешкоди для впровадження єдиних стандартів у цифровій трансформації агропромислового комплексу. Недостатня увага до аспектів кібербезпеки та захисту інформації також висвітлюється як ключова проблема, що потребує подальшого дослідження.

Отже, створення інтелектуальної платформи для оптимізації управління агропромисловою економікою на основі CALS-технологій вирішує ряд важливих питань: інтеграцію різних технологічних рішень в єдину систему, розробку сучасних алгоритмів для аналізу даних, забезпечення сумісності між різними системами та підвищення рівня кібербезпеки. Це дозволяє не лише покращити ефективність управління, а й створити основу для подальших наукових досліджень і практичних впроваджень у сфері цифровізації аграрного сектора.

Формулювання мети статті. Метою дослідження є розробка інтелектуальної платформи, яка на базі CALS-технологій забезпечує інтегроване управління агропромисловою економікою, оптимізує процеси планування, виробництва та контролю якості, а також сприяє прийняттю своєчасних і ефективних управлінських рішень у відповідь на сучасні виклики ринку.

Виклад основного матеріалу дослідження. Запропонована інтелектуальна платформа для оптимізації управління агропромисловою економікою базується на принципах CALS-технологій, що забезпечують безперервне отримання, обробку та обмін інформацією на всіх етапах життєвого циклу підприємства (рис. 1). Платформа інтегрує сучасні методи автоматизації, управління даними та підтримки прийняття рішень, що дозволяє підвищити оперативність та точність управлінських процесів, а також оптимізувати виробництво та збут продукції. Фрагмент-папка «Головне меню інтелектуальної платформи» наведено в таблиці 1.



Рис. 1. Структурна схема запропонованої інтелектуальної платформи

Архітектура платформи містить декілька ключових модулів. Серед першочергових – модуль інтегрованого управління даними, який поєднує інформацію з різних джерел: виробничих показників, ринкових тенденцій, кліматичних та природно-кліматичних характеристик регіонів. Такий модуль забезпечує єдине сховище даних, що є основою для аналізу та прийняття рішень. Важливу роль відіграють

CALS-технології, що дозволяють створювати цифрові моделі виробничих процесів і забезпечувати безперервне оновлення інформації.

Експертний модуль платформи призначений для підтримки ухвалення рішень. Він включає базу знань, алгоритми обробки даних, систему накопичення фактичної інформації та аналітичні інструменти, що дозволяє прогнозувати розвиток подій, оцінювати ризики та розробляти рекомендації щодо оптимізації технологічних процесів. Цей модуль адаптований до ширшого спектру агропромислових завдань, включаючи управління вирощуванням, переробкою та збутом продукції.

Для забезпечення гнучкості та адаптивності системи передбачено модуль налаштування, який бере до уваги специфічні умови кожного господарства, включаючи природно-кліматичні характеристики, особливості використовуваних технологій та структуру виробництва. Завдяки цьому модуль налаштування дозволяє адаптувати систему під конкретні умови аграрного підприємства, забезпечуючи ефективну інтеграцію всіх інформаційних потоків та підтримку керування в режимі реального часу.

Платформа передбачає розробку інтуїтивного інтерфейсу користувача, який поєднає всі функціональні модулі в єдину систему. Це дозволяє кінцевим користувачам – від операторів до керівників – оперативно отримувати доступ до необхідної інформації, аналізувати дані та приймати обґрунтовані управлінські рішення. Через війну використання цієї інтелектуальної платформи сприяє підвищенню конкурентоспроможності агропромислового комплексу рахунок оптимізації процесів, поліпшення якості продукції і на зниження витрат за збереження високого ступеня адаптивності до умов ринку.

Таблиця 1

Головне меню запропонованої інтелектуальної платформи

АРМ птахівника	База даних	Експертна система	Генератор налаштування
Відтворення птиці	Породи птахів світу	Хвороби птахів за: віком, породами, видами Діагностика: лікування, профілактика	Природно-кліматичні характеристики районів та регіону
Технологія переробки продуктів птахівництва	Раціон годування	Блок накопичених фактичних даних: інформація щодо епізоотичної обстановки (0); можливі етіологічні чинники хвороби (1); характеристика збудника хвороби та патогенез (2)	Характеристика порід господарства
Яйце: упаковка, зберігання, збут	Технологія утримання та вирощування	Блок прийняття рішення порода та напрямок продуктивності; річна продуктивність; жива маса; % безпеки; % запліднюваності; % виведення курчат – маса яйця	Закупівля племінних порід
Менеджмент	Оцінка рішення	Рекомендації щодо оптимального відбору, вирощування та утримання птахів з використанням методів авіабіомоніторингу	Монтаж та введення в експлуатацію птахофабрики
Маркетинг	Планування та контроль	Утилізація відходів птахівництва	–

Математична модель інтелектуальної платформи складається з декількох взаємопов'язаних компонентів, які описують динаміку системи, оцінку її ефективності та прийняття оптимальних управлінських рішень.

Позначимо вектор стану агропромислового підприємства як $X(t)$, який включає показники виробництва, ринкові дані, кліматичні та інші релевантні параметри. Динаміка зміни стану описується системою диференціальних рівнянь:

$$\frac{dX(t)}{dt} = F(X(t), U(t), \xi(t)), \quad (1)$$

де $U(t)$ – вектор управлінських рішень, а $\xi(t)$ – вектор випадкових зовнішніх впливів (наприклад, ринкові коливання або погодні умови). Ця модель дозволяє у реальному часі відслідковувати та прогнозувати зміну стану системи.

Для оцінки ефективності управління формується цільова функція, яка характеризує вигоду від прийнятих рішень з урахуванням витрат:

$$J = \int_0^T [\alpha \cdot Q(X(t)) - \beta \cdot C(U(t))] dt, \quad (2)$$

де $Q(X(t))$ – функція, що описує якість та продуктивність виробництва, $C(U(t))$ – функція витрат, пов'язаних із впровадженням управлінських рішень, а α та β – вагові коефіцієнти, що визначають важливість відповідних компонентів. Максимізація J дозволяє знаходити оптимальний баланс між прибутковістю та витратами.

На основі отриманих даних з центральної бази та аналізу стану системи, експертний модуль формує рекомендації щодо управлінських рішень. Цей процес можна представити як розв'язання оптимізаційної задачі:

$$\max_{U(t) \in U} J, \quad (3)$$

при обмеженнях, що задаються ресурсними, технологічними та нормативними вимогами.

Для забезпечення адаптивного управління платформа включає блок інтелектуальної обробки даних, який аналізує історичні та поточні дані системи. Приймається $Z(t)$ – набір ознак, що формується на основі стану $X(t)$. Прогнозування здійснюється за допомогою функції

$$\hat{X}(t + \Delta t) = G(Z(t), \theta), \quad (4)$$

де $G(\bullet)$ – нелінійна функція (наприклад, модель машинного навчання), що використовує параметри θ для прогнозування майбутнього стану системи через проміжок часу Δt .

Результати прогнозування використовуються у блоці підтримки прийняття рішень. Приймається $D(t)$ – множина рекомендацій, яку генерує система, базуючись на прогнозованому стані $\hat{X}(t + \Delta t)$ та поточних умовах. Математично блок підтримки рішень описується як:

$$J = \arg \max_{U(t) \in U} \{ \alpha \cdot Q(\hat{X}(t + \Delta t)) - \beta \cdot C(U(t)) + \gamma \cdot R(D(t)) \}, \quad (5)$$

де $R(D(t))$ – функція, що оцінює додаткову вигоду від рекомендацій, а γ – коефіцієнт ваги цього критерію.

Усі блоки працюють у режимі безперервного циклу:

- модуль збору даних формує $X(t)$ та $Z(t)$;
- модуль прогнозування на основі $Z(t)$ генерує $\hat{X}(t + \Delta t)$;
- блок підтримки прийняття рішень аналізує $\hat{X}(t + \Delta t)$ та формує оптимальне управління $U^*(t)$, що максимізує цільову функцію J ;
- застосування $U^*(t)$ впливає на майбутній стан системи, і цикл повторюється.

У межах дослідження пропонується практичний чисельний приклад застосування розробленої інтелектуальної платформи (рис. 1) з інтегрованою інтелектуальною обробкою даних, прогнозуванням та блоком підтримки прийняття рішень.

Припускається, що система описується трьома основними показниками, які входять до вектора стану $X(t) = [P(t), Q(t), D(t)]$, де $P(t)$ – обсяг виробництва (одиниць продукції); $Q(t)$ – якісний індекс продукції (балів); $D(t)$ – ринковий попит (одиниць продукції). На початковий момент $t = 0$ встановлено (у тисячах одиниць): $P(0) = 1000$ (вироблено 1000 одиниць), $Q(0) = 80$ (індекс якості), $D(0) = 500$ (ринковий попит).

Управлінське рішення $U(t)$ визначає рівень інвестицій у автоматизацію та модернізацію (в грошових одиницях). Припускається, на $t = 0$ платформа спочатку рекомендує інвестицію $U(0) = 50$. При цьому необхідно враховувати вплив зовнішніх факторів $\xi(t)$, наприклад, позитивний ринковий імпульс, який приймається за $\xi(0) = +5$.

Для простоти застосовується дискретна модель зміни кожного показника за одиницю часу ($\Delta t = 1$), яка враховує вплив управлінського рішення, відхилення від оптимальних значень і зовнішні впливи:

1) Обсяг виробництва: $P(t + 1) = P(t) + 0.1 \cdot U(t) - 0.05 \cdot (P(t) - 1000) + \xi(t)$, де 1000 – бажаний обсяг виробництва;

2) Індекс якості продукції: $Q(t + 1) = Q(t) + 0.05 \cdot U(t) - 0.02 \cdot (Q(t) - 85)$, де 85 – цільове значення індексу якості.

3) Ринковий попит: $D(t + 1) = D(t) + 0.03 \cdot U(t) - 0.01 \cdot (D(t) - 500) + 0.5 \cdot \xi(t)$, де 500 – базовий рівень попиту.

Розрахунок на першій ітерації ($t = 0 \rightarrow t = 1$). За вихідними даними: $P(0) = 1000$, $Q(0) = 80$, $D(0) = 500$, $U(0) = 50$, $\xi(0) = +5$ розраховуються нові значення:

1) Обсяг виробництва: $P(1) = 1000 + 0.1 \cdot 50 - 0.05 \cdot (1000 - 1000) + 5 = 1000 + 5 + 0 + 5 = 1010$;

2) Індекс якості продукції: $Q(1) = 80 + 0.05 \cdot 50 - 0.02 \cdot (80 - 85) = 80 + 2.5 - 0.02 \cdot (-5) = 80 + 2.5 + 0.1 = 82.6$;

3) Ринковий попит: $D(1) = 500 + 0.03 \cdot 50 - 0.01 \cdot (500 - 500) + 0.5 \cdot 5 = 500 + 1.5 + 0 + 2.5 = 504$.

Отже, після першої ітерації система переходить у стан: $X(1) = [1010, 82.6, 504]$.

Блок інтелектуальної обробки використовує поточні дані $X(0)$ та формує набір ознак $Z(0)$. Модель прогнозування (наприклад, навчена методом зворотного поширення похибки із застосуванням оптимізатора Adam [9, 10] нейронна мережа прямого поширення архітектури 5–12–3, рис. 2) прогнозує стан на наступний період: $\hat{X}(1) = G(Z(0), \theta) \approx (1010, 82.6, 505)$, тобто, прогноз співпадає з фактичними розрахунками для демонстрації роботи системи.

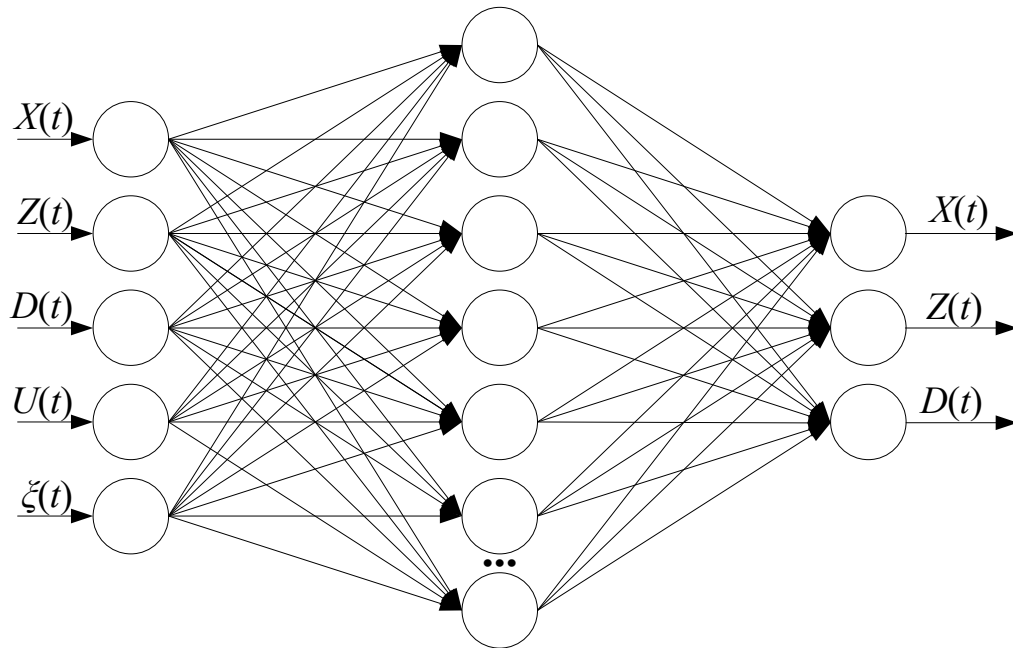


Рис. 2. Зовнішній вигляд розробленої мережі прямого поширення архітектури 5–12–3

На основі прогнозу $\hat{X}(1)$ система аналізує, чи задовольняє поточне управлінське рішення оптимальним критеріям (максимізація цільової функції, де враховано продуктивність і витрати). Якщо прогнозована динаміка показує позитивну тенденцію, система може рекомендувати невелике коригування інвестицій. Наприклад, аналіз може показати, що для подальшого зростання варто збільшити U на 10 %.

Отже, блок підтримки рішень рекомендує: $U^*(0) = 50 \cdot 1.1 = 55$.

На наступному кроці $t = 1$, використовуючи рекомендацію $U(1) = 55$ і, припускаючи, що інший зовнішній вплив $\xi(1) = +3$, перераховуються нові значення:

1) Обсяг виробництва: $P(2) = 1010 + 0.1 \cdot 55 - 0.05 \cdot (1010 - 1000) + 3 = 1010 + 5.5 - 0.05 \cdot 10 + 3 = 1010 + 5.5 - 0.5 + 3 = 1018$;

2) Індекс якості продукції: $Q(2) = 82.6 + 0.05 \cdot 55 - 0.02 \cdot (82.6 - 85) = 82.6 + 2.75 - 0.02 \cdot (-2.4) \approx 82.6 + 2.75 + 0.048 = 85.398$;

3) Ринковий попит: $D(2) = 504 + 0.03 \cdot 55 - 0.01 \cdot (504 - 500) + 0.5 \cdot 3 = 504 + 1.65 - 0.04 \cdot 4 + 1.5 \approx 504 + 1.65 - 0.04 + 1.5 = 507.11$.

Отже, стан системи на $t = 2$ стає: $X(2) \approx [1018, 85.40, 507.11]$.

За допомогою такого циклічного процесу платформа дозволяє адаптивно реагувати на зміни зовнішнього середовища та внутрішніх показників, що сприяє оптимізації управління агропромисловою економікою.

Отже, запропонована інтелектуальна платформа, що базується на CALS-технологіях, демонструє свою ефективність через інтеграцію модулів збору даних, інтелектуальної обробки та прогнозування, а також підтримки прийняття рішень, що дозволяє адаптивно оптимізувати управління агропромисловою економікою шляхом безперервного циклічного коригування управлінських рішень на основі аналізу поточного стану системи та прогнозування її розвитку, що підтверджується чисельним прикладом переходу від початкового стану до оптимізованого при збільшенні інвестицій.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку.

1. Запропоновано єдину інтелектуальну платформу на основі CALS-технологій для управління агропромисловою економікою, що дозволяє інтегрувати модулі збору, обробки даних, прогнозування та підтримки прийняття рішень.

2. Розроблено математичну модель з використанням диференціальних рівнянь, яка описує динаміку ключових показників (виробництво, якість продукції, ринковий попит) та дозволяє оптимізувати управлінські рішення в режимі реального часу.

3. Побудовано архітектуру платформи, що включає інтегрований модуль управління даними, експертний блок з прогнозуванням на основі нейронних мереж та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс для кінцевих користувачів.

4. Проведено чисельне моделювання, яке продемонструвало ефективність платформи – адаптивна корекція інвестицій призвела до зростання обсягу виробництва, підвищення якості продукції та збільшення ринкового попиту.

5. Перспективи подальших розвідок даному напрямку:

- оптимізація методів обробки даних та алгоритмів прогнозування з використанням сучасних машинних алгоритмів для підвищення точності прийняття рішень;
- інтеграція додаткових параметрів та показників, що впливають на агропромислове виробництво, для більш комплексного аналізу і підтримки прийняття рішень;
- розробка стандартів сумісності між різними інформаційними системами та посилення заходів кібербезпеки для захисту інформації в умовах цифрової трансформації.

Список використаних джерел:

1. Дригола К. В., Вертелецька О. М., Бойко В. В. Агропромисловий комплекс України в контексті виходу на міжнародний ринок. *Економічний простір*. 2019. № 146. С. 5–19.
2. Волікова В. В. Управління конкурентоспроможністю продукції українських товаровиробників на світовому ринку. *Молодіжний економічний вісник ХНЕУ ім. С. Кузнеця* : електронний журнал. 2021. № 6. С. 39–43.
3. Кравець М. А., Гріхогодов М. С., Казакова Н. А. АПК України на сучасному етапі розвитку (стан і перспективи). *Науковий вісник Херсонського державного університету*. 2015. Вип. 13. Ч. 1. С. 22–28.
4. Дергалюк М. О. PEST-аналіз факторів зовнішнього впливу на розвиток АПК регіонів. *Проблеми і перспективи економіки та управління*. 2021. № (2(10)). С. 148–152.
5. Антонюк Г. Я., Панюра Г. Я. Проблеми розвитку АПК на сільських територіях Львівщини. *Соціально-економічні проблеми сучасного періоду України*. 2013. Вип. 6 (104). С. 220–228.
6. Стоволос Н. Б. Модель формування загальнодержавної системи виробництва органічної продукції. *Вісник ЖДТУ. Серія : Економічні науки*. 2014. № 4 (70). С. 98–102.
7. Малік М. Й., Шпикуляк О. Г. Розвиток аграрного підприємництва в умовах інституціональних трансформацій. *Економіка АПК*. 2017. № 2. С. 5–16.
8. Козловський С. В., Козловський В. О., Бурлака О. М. Стійкість розвитку аграрної галузі регіону як чинник економічного зростання України. *Економіка України*. 2014. № 9(634). С. 59–73.
9. MLP (multi-layer perceptron) and RBF (radial basis function) neural network approach for estimating and optimizing 6-gingerol content in *Zingiber officinale* Rosc. in different agro-climatic conditions / M. Sahoo, S. Dey, S. Sahoo, A. Das, A. Ray, S. Nayak, E. Subudhi. *Industrial Crops and Products*. 2023. Vol. 198. 116658.
10. Souza P. R., Dotto G. L., Salau N. P. G. Artificial neural network (ANN) and adaptive neuro-fuzzy interference system (ANFIS) modelling for nickel adsorption onto agro-wastes and commercial activated carbon. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2018. Vol. 6. Iss. 6. P. 7152–7160.

УДК 004.05

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.15>

Володимир ЛАВРИК

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри інформаційних та комп'ютерних технологій, Київський національний університет технологій та дизайну, lavryk.vv@knutd.edu.ua

ORCID: 0000-0002-6448-2470

Владислава СКІДАН

кандидат технічних наук, доцент, завідувачка кафедри інформаційних та комп'ютерних технологій, Київський національний університет технологій та дизайну, skidan.vv@knutd.edu.ua

ORCID: 0000-0002-8358-9759

Максим СУКАЛО

доктор філософії, старший викладач кафедри інформаційних та комп'ютерних технологій, Київський національний університет технологій та дизайну, sukalo.ml@knutd.edu.ua

ORCID: 0000-0003-3437-8290

Антоніна ВОЛІВАЧ

кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних та комп'ютерних технологій, Київський національний університет технологій та дизайну, volivach.ap@knutd.com.ua

ORCID: 0000-0002-7119-7774

Юрій ЛЕБЕДЕНКО

кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних та комп'ютерних технологій, Київський національний університет технологій та дизайну, lebedenko.yo@knutd.edu.ua

ORCID: 0000-0002-1352-9240

ВИКОРИСТАННЯ ІОТ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СТАНУ РОСЛИН В СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ

Анотація. У статті розглядається процес розробки інтелектуального IoT-пристрою для моніторингу стану рослин у сільському господарстві. Описано архітектуру системи, методіку навчання нейронної мережі та механізм аналізу зображень у реальному часі.

Метою даного дослідження є розробка та експериментальна перевірка інтелектуального IoT-пристрою для моніторингу стану рослин, здатного виявляти ознаки захворювань і наявність шкідників за допомогою згорткових нейронних мереж.

Методологія дослідження. У дослідженні використано комплексний підхід, що поєднує апаратне та програмне забезпечення в єдину IoT-систему моніторингу рослин. Для аналізу зображень рослин застосовано згорткову нейронну мережу YOLOv9.

Наукова новизна полягає у створенні та апробації прототипу автономного інтелектуального пристрою для моніторингу стану рослин. Запропоновано архітектуру системи, яка дозволяє локальне виявлення ознак хвороб і шкідників без підключення до зовнішніх серверів, що знижує затримки та підвищує надійність у польових умовах.

Висновки. У результаті дослідження було успішно розроблено та протестовано прототип інтелектуального IoT-пристрою для моніторингу стану рослин у сільському господарстві. Проведені експерименти довели ефективність роботи пристрою в умовах реального середовища.

Ключові слова: інтернет речі, IoT-пристрій, цифрові технології, нейронні мережі, сільське господарство.

Volodymyr LAVRIK, Vladyslav SKIDAN, Maksym SUKALO, Antonina VOLIVACH, Yuriy LEBEDENKO. USING IOT DEVICES TO MONITOR PLANT HEALTH IN AGRICULTURE

Abstract. The article considers the process of developing an intelligent IoT device for monitoring plant health in agriculture. The system architecture, neural network training methodology, and real-time image analysis mechanism are described.

The purpose of this study is to develop and experimentally verify an intelligent IoT device for monitoring plant health, capable of detecting signs of diseases and the presence of pests using convolutional neural networks.

Research methodology. The study uses a comprehensive approach that combines hardware and software into a single IoT plant monitoring system. The YOLOv9 convolutional neural network is used to analyze plant images.

The scientific novelty lies in the creation and testing of a prototype of an autonomous intelligent device for monitoring plant health. A system architecture is proposed that allows local detection of signs of diseases and pests without connecting to external servers, which reduces delays and increases reliability in field conditions.

Conclusions. As a result of the research, a prototype of an intelligent IoT device for monitoring the condition of plants in agriculture was successfully developed and tested. The experiments conducted proved the effectiveness of the device in a real environment.

Key words: Internet of Things, IoT device, digital technologies, neural networks, agriculture.

Постановка проблеми. Сільське господарство є однією з ключових галузей економіки, від якої залежить продовольча безпека. Зі змінними військово-політичними, кліматичними та демографічними факторами збільшується потреба в ефективному управлінні сільськогосподарськими ресурсами [4]. Традиційні методи моніторингу та управління рослинами є трудомісткими та не завжди точними. У цьому контексті, інноваційні технології, такі як Інтернет речі (IoT, від. англ. Internet of Things) та нейронні мережі, мають великий потенціал для покращення управління сільськогосподарськими культурами [12].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Короткий огляд сучасних застосувань технологій IoT у сільському господарстві надано в таблиці 1 [5].

Таблиця 1

Огляд сучасних технологій IoT у сільському господарстві

Застосування IoT в сільському господарстві	Опис	Приклади використання
Моніторинг стану ґрунту	Використання сенсорів для вимірювання вологості, температури, кислотності та рівня поживних речовин у ґрунті.	Контроль рівня зволоження для оптимального поливу, аналіз складу ґрунту перед посадкою.
Системи точного зрошення	Автоматизація поливу на основі даних сенсорів і прогнозів погоди для раціонального використання води.	Інтелектуальні системи поливу, які включаються лише за потреби, залежно від вологості ґрунту та погоди.
Розумні теплиці	Автоматизація управління мікрокліматом у теплицях на основі даних сенсорів (температура, вологість, рівень CO ₂).	Підтримання оптимальних умов для вирощування культур, автоматичне керування освітленням і поливом.
Моніторинг навколишнього середовища	Сенсори IoT збирають дані про температуру, вологість, швидкість вітру, рівень сонячного випромінювання, які впливають на врожайність.	Прогнозування погоди для оптимального планування сільськогосподарських робіт.
Управління фермерською технікою	Використання GPS та IoT для автоматизації руху тракторів, комбайнів та іншого обладнання.	Автономне управління сільськогосподарською технікою для точного посіву, збирання врожаю або обробки культур.
Віддалений контроль за фермерськими господарствами	Збір даних із сенсорів і камер, які дозволяють фермеру стежити за станом господарства в реальному часі через мобільні додатки або веб-інтерфейси.	Віддалений моніторинг теплиць, тваринницьких ферм, стану складських приміщень.
Системи управління запасами	Використання сенсорів для контролю рівня заповнення сховищ для добрив, кормів, води та палива.	Виявлення нестачі корму або добрив, автоматичне замовлення необхідних матеріалів через систему IoT.
Моніторинг стану тварин	Сенсори IoT та RFID-теги для відстеження стану здоров'я, місцезнаходження та активності сільськогосподарських тварин.	Контроль температури та фізичної активності тварин для раннього виявлення хвороб.

Однією з головних переваг використання IoT у цій галузі є здатність сенсорних систем збирати дані про різноманітні параметри: вологість ґрунту, температуру, рівень освітлення, стан атмосфери та наявність шкідників. Ці дані передаються в центральні системи обробки або хмарні сервіси, де вони аналізуються для розробки ефективних рекомендацій. [9]

Однією з ключових складових таких інтелектуальних систем є нейронні мережі. Їх головна перевага полягає у здатності до навчання – вони можуть обробляти великі обсяги даних, виявляючи в них закономірності, тенденції та взаємозв'язки. Це робить нейронні мережі особливо ефективними у вирішенні складних задач, які важко або неможливо формалізувати традиційними методами. Зокрема, вони активно застосовуються для розпізнавання образів, обробки природної мови, прогнозування та автоматизації рішень у багатьох сферах, включаючи сільське господарство.

Існують різні типи нейронних мереж, які відрізняються архітектурою та сферою застосування. Наприклад, згорткові нейронні мережі (CNN) ефективні для аналізу візуальної інформації, що робить їх надзвичайно корисними при роботі з зображеннями рослин. Саме такі мережі можуть бути вбудовані в IoT-системи для розпізнавання симптомів захворювань або виявлення шкідників. Рекурентні нейронні мережі (RNN) краще підходять для обробки часових рядів і текстових даних, тоді як генеративно-змагальні мережі (GAN) дозволяють створювати нові дані, подібні до реальних.

Сучасні нейронні мережі мають складну багаторівневу структуру. Прикладом такої складної архітектури є згорткова нейронна мережа YOLOv8, яка призначена для виявлення об'єктів на зображеннях і може ефективно використовуватися в системах автоматичного моніторингу стану рослин. Опис її шарів і принципу роботи наведено на (рис. 1) [9].

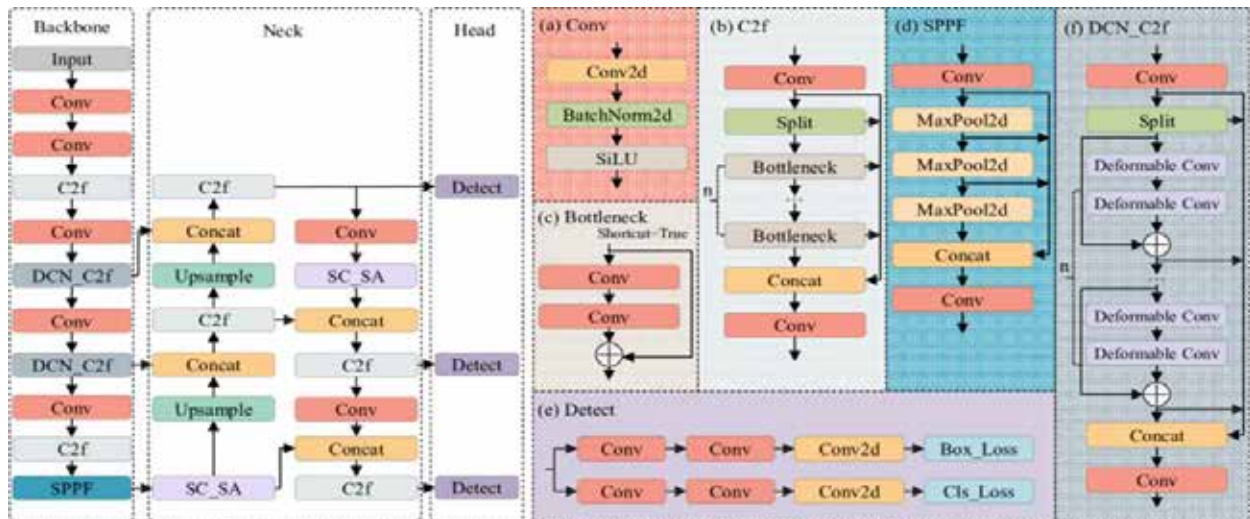


Рис. 1. Опис шарів та схема роботи нейронної мережі YOLOv8

Використання нейронних мереж для моніторингу в сільському господарстві є важливим кроком у модернізації аграрного сектору, адже ці технології дозволяють здійснювати глибокий аналіз даних, виявляти закономірності та приймати обґрунтовані рішення. Нейронні мережі, як один із основних інструментів штучного інтелекту, дають можливість автоматизувати моніторинг стану культур, прогнозувати їхній розвиток і навіть визначати потенційні загрози для врожаю. [1, 2]

Одним із ключових напрямів використання нейронних мереж є аналіз зображень. Завдяки сучасним технологіям комп'ютерного зору, нейронні мережі можуть обробляти фото- та відеоматеріали, зроблені за допомогою дронів, камер або інших пристроїв, і виявляти ознаки хвороб рослин, шкідників або дефіциту поживних речовин. Наприклад, мережі здатні розпізнавати кольорові зміни на листках, що можуть свідчити про грибкові інфекції, або структуру пошкоджень, які вказують на активність комах-шкідників.

Ще одним важливим застосуванням є прогнозування стану культур і врожайності. Нейронні мережі здатні обробляти великі масиви даних, такі як показники вологості ґрунту, температури, кількості опадів та інших екологічних факторів. На основі історичних даних вони можуть прогнозувати, як ці фактори вплинуть на розвиток рослин, і допомагати фермерам приймати рішення щодо поливу, удобрення чи захисту від шкідників. [11]

Сучасні технології бездротової передачі даних відіграють вирішальну роль у створенні ефективних і масштабованих систем управління фермерськими угіддями. Ці технології дозволяють забезпечувати безперервний обмін інформацією між сенсорами, пристроями автоматизації та хмарними платформами, створюючи єдину екосистему для аналізу даних і прийняття рішень.

Сільське господарство часто має унікальні вимоги до технологій передачі даних через значні території, ізоляваність об'єктів і потребу в енергоефективності.

У таблиці 2 показано порівняння сучасних технологій бездротової передачі даних для сільсько-господарських пристроїв моніторингу [6].

Для забезпечення інтелектуального моніторингу у сільському господарстві необхідно створити платформу, яка виконує такі поставлені умови:

1. Продуктивність, достатня для запуску нейронних мереж для визначення об'єктів
2. Енергоефективність, яка дозволяє пристрою працювати декілька тижнів без необхідності зміни батареї
3. Автономність зв'язку, щоб мати можливість підключення до мережі Інтернет у віддалених районах
4. Компактність і адекватна ціна для можливості майбутнього масового застосування

Враховуючи перераховані вище фактори, було розроблено і створено платформу, яка має структурну схему, зображену на (рис. 2) [6].

Таблиця 2

**Порівняльна характеристика сучасних технологій бездротової передачі даних
для сільського господарства**

Технологія	Дальність	Швидкість передачі даних	Споживання енергії	Ціна обладнання	Характеристика
LoRa	До 15–20 км (відкритий простір)	0,3–50 Кбіт/с	Дуже низьке	Низька	Підходить для великої кількості сенсорів, працює у віддалених районах.
Zigbee	До 100 м	До 250 Кбіт/с	Низьке	Низька	Добре для локальних мереж, підтримує mesh-структури.
NB-IoT	До 10 км (у міській зоні)	До 250 Кбіт/с	Дуже низьке	Середня	Використовує інфраструктуру мобільних мереж, стабільний зв'язок.
Wi-Fi	До 100 м (в приміщенні), до 300 м (на відкритому просторі)	До 1 Гбіт/с	Середнє	Низька	Висока швидкість, але обмежена дальність і високі витрати енергії.
Bluetooth LE	До 50 м	До 2 Мбіт/с	Дуже низьке	Низька	Підходить для мобільних пристроїв, низька затримка.
4G LTE	До 10–15 км	До 150 Мбіт/с	Середнє	Середня	Широке покриття, підходить для передачі відео чи великих даних.
5G	До 1–10 км	До 10 Гбіт/с	Високе	Висока	Мінімальна затримка, висока пропускна здатність.
Супутниковий зв'язок	Глобальне покриття	До 100 Мбіт/с	Високе	Дуже висока	Використовується у віддалених регіонах, де немає мобільного покриття.

Для ролі центрального обчислювального пристрою було прийнято рішення використовувати в даному проекті одноплатний комп'ютер Raspberry Pi Zero 2W. Плата містить 4-ядерний 64-розрядний процесор Arm Cortex-A53 з тактовою частотою 1 ГГц. Її основою є система в комплекті Raspberry Pi RP3A0 (SiP), яка включає кристал Broadcom BCM2710A1 із 512 МБ LPDDR2 SDRAM. Оновлений процесор забезпечує Raspberry Pi Zero 2 W на 40% вищу однопотокову продуктивність і в п'ять разів вищу багатопотокову продуктивність, ніж оригінальний одноядерний Raspberry Pi Zero [10].

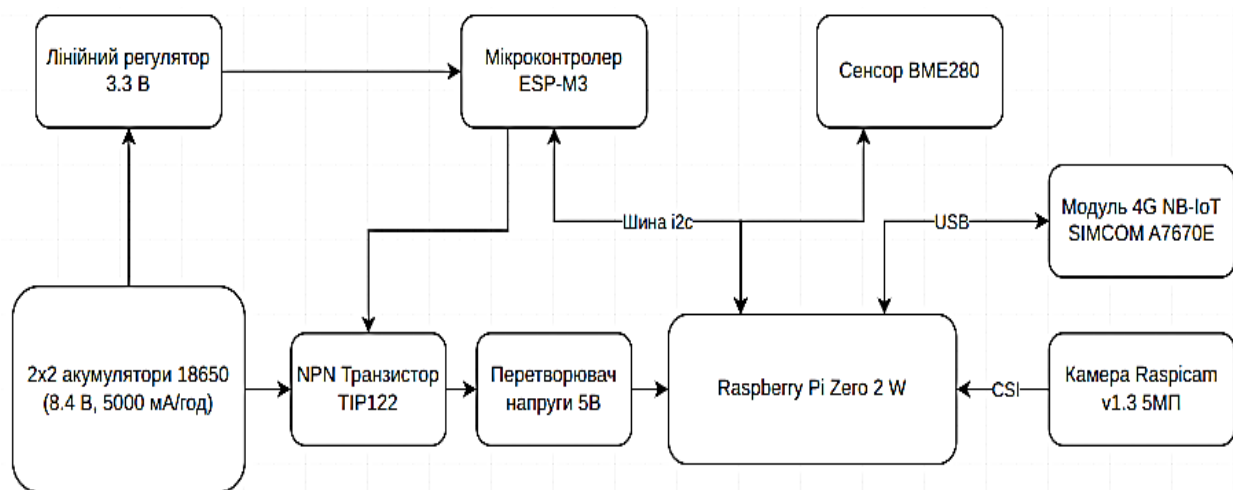


Рис. 2. Структурна схема апаратної частини пристрою

Єдині недоліки плати, важливі для створення інтелектуальних пристроїв інтернету речей – відсутність у процесорі прискорювача нейронних мереж та недостатній об'єм оперативної пам'яті для запуску більшості сучасних моделей машинного навчання. Враховуючи те, що нейронною мережею обробляється єдиний кадр за декілька годин, така продуктивність не створює серйозних перешкод.

Для комунікації з мережею Інтернет була вибрана технологія інтернету речей NB-IoT. Її перевага в сільському господарстві полягає в відсутності необхідності створення спеціальної інфраструктури як у випадку Wi-Fi, LoRa та Zigbee, високій швидкості передачі даних (10 Мбіт/с завантаження, 5 Мбіт/с вивантаження) та низькому енергоспоживанні відносно швидкісного 4G/5G з'єднання. Головним недоліком такої мережі відносно LoRa, Wi-Fi та Zigbee є необхідність купівлі та поповнення SIM карти із підтримкою 4G з'єднання.

Для зручного монтажу всіх необхідних компонентів була створена макетна плата, яка поєднує на собі контролер живлення ESP-M3 8285, сенсор температури, вологості та атмосферного тиску Bosch BME280 [3, 7], транзистор TIP122 та інші необхідні для живлення та з'єднання компоненти (рис. 3).

Зовнішній вигляд пристрою та всі компоненти, зібрані в корпусі можна побачити відповідно на (рис. 4).

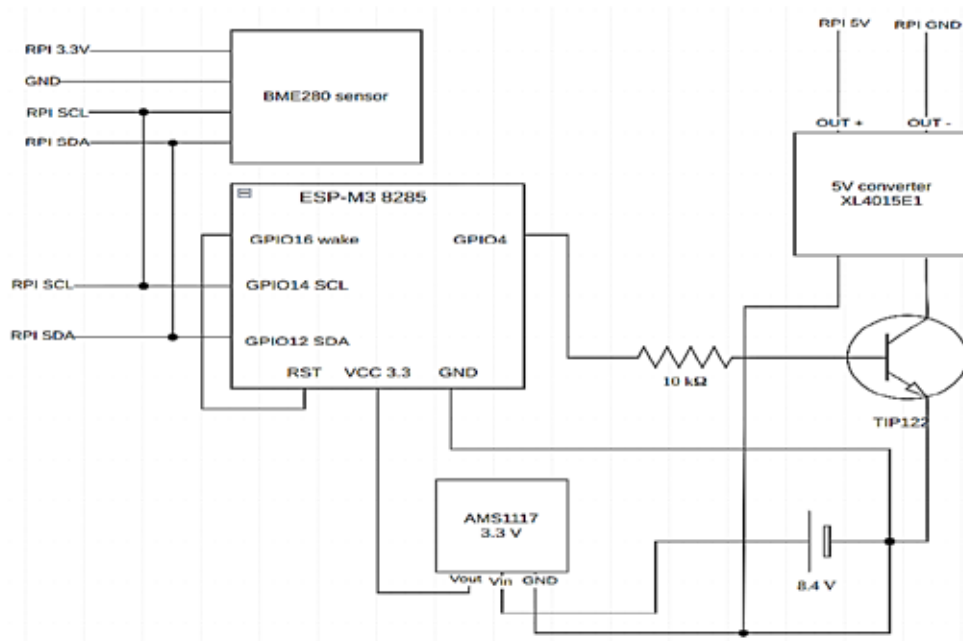


Рис. 3. Принципова схема основної плати пристрою



Рис. 4. Зовнішній вигляд пристрою в корпусі

Для тренування нейронної мережі YOLOv8 на власному наборі даних було використано онлайн середовище розробки Google Colab з відеокартою Nvidia Tesla L4, 60 Гб оперативної пам'яті та 70 Гб дискового простору.

Порівняння між реальними та передбаченими моделлю об'єктами можна побачити відповідно на (рис. 5).



Рис. 5. Об'єкти аналізу даних: зліва – зображення реальних об'єктів із валідаційного набору даних; справа – відповідні об'єкти, передбачені моделлю для цього самого набору

На рисунках представлено зразки листя суниці із симптомами захворювань, зокрема різними формами плямистостей та сірою гниллю. Продемонстровано приклади експериментальних результатів, які ілюструють рівень впевненості моделі у виявленні патологічних змін. Представлений у роботі інтелектуальний IoT-пристрій дозволив автоматично ідентифікувати та сегментувати уражені ділянки листя з високим ступенем точності.

Висновки. У дослідженні було детально розглянуто процес створення сільськогосподарського IoT-пристрою з використанням нейронних мереж для моніторингу стану культур. Розділ охоплює всі ключові етапи розробки – від проектування апаратної частини до створення програмного забезпечення та інтеграції моделей машинного навчання, спрямованих на виявлення рослин-шкідників і хвороб.

Особлива увага приділена тренуванню моделі машинного навчання на основі нейронної мережі YOLOv8. Ця модель була навчена на спеціалізованих наборах даних, що включають зображення рослин-шкідників і культур із хворобами. Проведено оптимізацію моделі для роботи на пристроях з обмеженими обчислювальними ресурсами, що дозволяє виконувати точну і швидку обробку зображень безпосередньо на пристрої. Успішна інтеграція нейронної мережі значно підвищує ефективність моніторингу та дозволяє оперативно виявляти проблеми на ранніх етапах.

Таким чином, у роботі описано повний цикл створення IoT-пристрою – від апаратної реалізації до програмного забезпечення й машинного навчання. Отримані результати демонструють високу ефективність запропонованого підходу, який дозволяє автоматизувати процес моніторингу, мінімізувати витрати ресурсів та підвищити якість управління сільськогосподарськими процесами. Розроблений пристрій може бути успішно застосований у реальних умовах, а також слугувати основою для подальшого вдосконалення інтелектуальних технологій у аграрній сфері.

Список використаних джерел:

1. A review of deep learning techniques used in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. Vol. 209. Article 107877. DOI: 10.1016/j.compag.2023.107877.
2. Applications of Machine Learning and Deep Learning in Agriculture: A Comprehensive Review. *Discover Artificial Intelligence*. 2025. Vol. 3, No. 1. Article 33. DOI: 10.1007/s44196-025-00033-8.
3. Bosch Sensortec. BME280 Combined humidity and pressure sensor URL: <https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/humidity-sensors-bme280/> Дата звернення: 21 квітня 2025 р.
4. Garg S., Pundir P., Jindal H., Saini H., Garg S. Towards a Multimodal System for Precision Agriculture using IoT and Machine Learning. 12th ICCNT 2021 conference at IIT Kharagpur, India. 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.04895>.

5. Hammad Shahab, Muhammad Naeem, Muhammad Iqbal, Muhammad Aqeel, Syed Sajid Ullah. IoT-driven smart agricultural technology for real-time soil and crop optimization. *Smart Agricultural Technology*. Volume 10, March 2025, 100847. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100847>.
6. Natraj A. A., Lee B., Castiblanco F. A., Buckmaster D. R., Wang C. C., Love D. J., Krogmeier J. V., Butt M. M., Ghosh A. Ambient IoT: Communications Enabling Precision Agriculture. arXiv. 2024. URL: <https://arxiv.org/abs/2409.12281>.
7. Plant Disease Detection Using Deep Learning Techniques. *Journal of Intelligent Agriculture and Precision*. 2025. Vol. 1, No. 2. P. 55–64. DOI: 10.1234/jiap.2025.227089.
8. Prem Rajak, Abhratanu Ganguly, Satadal Adhikary, Suchandra Bhattacharya. Internet of Things and smart sensors in agriculture: Scopes and challenges. *Journal of Agriculture and Food Research*. Volume 14, December 2023, 100776. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100776>.
9. Qin R., Wang Y., Liu X., Yu H. Advancing precision agriculture with deep learning enhanced SIS-YOLOv8 for Solanaceae crop monitoring. *Frontiers in Plant Science*, 2025. 15, 1485903.
10. Raspberry Pi Foundation. Raspberry Pi Zero 2 W. URL: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-zero-2-w/>. –Дата звернення: 21 квітня 2025 р.
11. Sadowski S., Spachos P. Wireless Technologies for Agricultural Monitoring using Internet of Things Devices with Energy Harvesting Capabilities. arXiv. 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2005.02477>.
12. Udutalapally V., Mohanty S. P., Pallagani V., Khandelwal V. sCrop: A Internet-of-Agro-Things (IoAT) Enabled Solar Powered Smart Device for Automatic Plant Disease Prediction. Published in arXiv.org 9 May 2020 DOI:10.48550/arXiv.2005.06342.

УДК 377.7:35(417)

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.16>**Маріанна МАРУСИНЕЦЬ**

кандидат філологічних наук, доцент кафедри історії та суспільних дисциплін, старший науковий співробітник, старший дослідник,

Науково-дослідний центр імені Тіводора Легоцькі

Закарпатського угорського інституту імені Ференца Ракоці II

ORCID: 0000-0001-7366-9328

ВИКЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В РЕСПУБЛІЦІ ІРЛАНДІЯ

Анотація. У статті представлено аналіз тенденцій розвитку сфери штучного інтелекту (ШІ) та технологічних стартапів у Республіці Ірландії за останні роки. Особлива увага приділяється тому, як ірландська держава стала новою європейською штаб-квартирою таких технологічних гігантів, як «Microsoft», «Google» і «Facebook». Зазначається, що після виходу Великої Британії з ЄС міжнародні бренди почали переносити свої європейські штаб-квартири з Великої Британії до Республіки Ірландія. У статті підкреслюється важливість ефективної взаємодії між академічними колами та промисловістю, що дає змогу Ірландії посідати лідируючі позиції в галузі штучного інтелекту. Наголошується на зростаючому попиті на технології зі ШІ в різних секторах економіки та перспективах їх розвитку в країні. Аргументовано, що в сучасному світі технології зі ШІ відіграють дедалі вагомішу роль у різних сферах життя, від автоматизації виробничих процесів до поліпшення якості життя людей. Однак, незважаючи на широке поширення ШІ, досі не існує єдиного визначення цього поняття. У цьому контексті зроблено спробу проаналізувати різні підходи до визначення ШІ, запропоновані різними експертами та організаціями, а також розглянути основні класифікації та сфери застосування ШІ.

Мета дослідження полягає у всебічному та комплексному аналізі тенденцій, потенціалу та перспектив розвитку штучного інтелекту в Республіці Ірландія.

Наукова новизна. Наукова новизна дослідження полягає в комплексному аналізі розвитку ШІ в Республіці Ірландія, а також в обґрунтуванні того, що ірландська держава має багату історію технологічних інновацій, і уряд активно інвестує в розвиток ШІ, що сприяє розвитку технологічного сектору країни. Ірландські фахівці мають високий рівень освіти і володіють англійською мовою, що полегшує взаємодію з компаніями по всьому світу. ШІ стрімко розвивається і може істотно вплинути на життя і роботу ірландців, привносячи як переваги, так і ризики. Республіка Ірландія активно працює над створенням справедливої та чесної системи ШІ, успішно вирішуючи складні етичні питання і встановлюючи суворі правила. Етичні принципи ШІ в Республіці Ірландія включають прозорість, справедливість, недискримінацію, конфіденційність і безпеку. Під час дослідження та систематизації офіційних документів державних органів влади Республіки Ірландія, а також аналізу актуальних фактографічних даних було визначено ключові напрями, потенціал і перспективи подальшого розвитку ШІ в Республіці Ірландія.

Методологія. Теоретико-методологічне підґрунтя дослідження містить загальнонаукові методи аналізу, синтезу, індукції та дедукції, а також системний метод, метод структурно-функціонального аналізу та правові методи в кібербезпеці. Для того щоб зрозуміти сутність розвитку ШІ в Республіці Ірландія, а також визначити перспективи та виклики на шляху його еволюції було застосовано системний підхід. Він дозволяє розглядати ШІ у якості цілісної складної системи, що складається з підсистем та елементів, які знаходяться в постійній взаємодії. Дослідження значної правової бази в межах регулювання системи захисту персональних даних та інформації обумовило використання міждисциплінарного підходу. У межах використання міждисциплінарного підходу було застосовано правові методи в кібербезпеці, які включають розроблення нормативно-правової бази, що регламентує відносини, пов'язані зі створенням, зберіганням, обміном і доступністю інформації, а також створення методичних рекомендацій, дотримання яких забезпечить збереження персональних даних та конфіденційної інформації.

Висновок. У результаті дослідження доведено, що нормативна база Республіки Ірландія спрямована на баланс інновацій та етичних норм, із застосуванням «Закону про захист даних» 2018 р. і «Загального положення про захист даних» 2018 р. до програм зі ШІ, що використовують персональні дані. У ЄС відбулася зміна в регулюванні ШІ з ухваленням «Закону Європейського союзу про штучний інтелект» 2024 р. Його вплив на Республіку Ірландія ще належить визначити, але він матиме значні наслідки для підходу держави до штучного інтелекту в майбутньому. Стратегії забезпечення відповідності вимогам штучного інтелекту в ірландській державі ґрунтуються на кількох принципах: створення надійної нормативно-правової бази, формування культури відповідальності, випереджувальний аналіз ризиків, співпраця та адаптація до технологічних досягнень.

Ключові слова: Республіка Ірландія, штучний інтелект, ЄС, інформація, технології, компанії, стартапи, Національна стратегія в галузі штучного інтелекту, Закон ЄС про штучний інтелект.

Marianna MARUSYNETS. CHALLENGES AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE REPUBLIC OF IRELAND

Abstract. The article presents an analysis of trends in the development of artificial intelligence (AI) and technology startups in the Republic of Ireland in recent years. Particular attention is paid to how the Irish state has become the new European headquarters of such technology giants as Microsoft, Google and Facebook. It is noted that after the UK's exit from the EU, international brands began to move their European headquarters from the UK to the Republic of Ireland. The article emphasises the importance of effective interaction between academia and industry, which allows Ireland to take a leading position in the field of artificial intelligence. The article emphasises the growing demand for AI technologies in various sectors

of the economy and the prospects for their development in the country. It is argued that in the modern world, AI technologies are playing an increasingly important role in various spheres of life, from automating production processes to improving the quality of life. However, despite the widespread use of AI, there is still no single definition of this concept. In this context, an attempt is made to analyse different approaches to the definition of AI proposed by various experts and organisations, as well as to consider the main classifications and applications of AI.

The purpose of the study is to provide a comprehensive and integrated analysis of trends, potential and prospects for the development of artificial intelligence in the Republic of Ireland.

Scientific novelty. The scientific novelty of the study lies in the comprehensive analysis of AI development in the Republic of Ireland, as well as in the substantiation that the Irish state has a rich history of technological innovation, and the government is actively investing in the development of AI, which contributes to the development of the country's technology sector. Irish specialists have a high level of education and English language skills, which facilitates interaction with companies around the world. AI is developing rapidly and can significantly affect the life and work of the Irish, bringing both benefits and risks. The Republic of Ireland is actively working to create a fair and just AI system, successfully addressing complex ethical issues and establishing strict rules. The ethical principles of AI in the Republic of Ireland include transparency, fairness, non-discrimination, privacy, and security. The study and systematisation of official documents of the Republic of Ireland's state authorities, as well as the analysis of relevant factual data, identified key areas, potential and prospects for further AI development in the Republic of Ireland.

Methodology. The theoretical and methodological basis of the study includes general scientific methods of analysis, synthesis, induction and deduction, as well as the systemic method, the method of structural and functional analysis and legal methods in cybersecurity. In order to understand the essence of AI development in the Republic of Ireland, as well as to identify the prospects and challenges on the way of its evolution, a systematic approach was applied. It allows us to consider AI as an integral complex system consisting of subsystems and elements that are in constant interaction. The study of the extensive legal framework within the framework of the regulation of the personal data and information protection system has led to the use of an interdisciplinary approach. As part of the interdisciplinary approach, legal methods in cybersecurity were applied, including the development of a legal framework governing relations related to the creation, storage, exchange and accessibility of information, as well as the creation of methodological recommendations, compliance with which will ensure the safety of personal data and confidential information.

Conclusion. The study proves that the regulatory framework of the Republic of Ireland is aimed at balancing innovation and ethical standards, with the application of the Data Protection Act 2018 and the General Data Protection Regulation 2018 to AI programs that use personal data. In the EU, there has been a shift in AI regulation with the adoption of the European Union Artificial Intelligence Act 2024. Its impact on the Republic of Ireland remains to be seen, but it will have significant implications for the country's approach to AI in the future. The Irish state's AI compliance strategies are based on several principles: establishing a robust regulatory framework, fostering a culture of responsibility, proactive risk analysis, cooperation, and adaptation to technological advances.

Key words: Republic of Ireland, artificial intelligence, EU, information, technology, companies, start-ups, National Strategy for Artificial Intelligence, EU Artificial Intelligence Act.

Постановка проблеми. Останнім часом Республіка Ірландія привертає увагу технологічних фахівців. На Смарагдовому острові з'являється безліч технологічних стартапів. Штучний інтелект (ШІ) є перспективним напрямом досліджень, і результати інновацій у цій галузі викликають великий інтерес. Протягом тривалого часу Республіка Ірландія не мала значного впливу на світовий розвиток. Однак нині ірландська держава являє собою серйозного конкурента як для невеликих міст, так і для великих мегаполісів, таких як Лондон. Технологічний прогрес перетворив Дублін на нову європейську штаб-квартиру технологічних гігантів. «Microsoft», «Google» і «Facebook» звернули увагу на це місто. Вихід Великобританії з ЄС – Брекзїт також може бути розглянутий як потенційна перевага. Це пов'язано з тим, що після Брекзїту Республіка Ірландія залишається країною-членом ЄС, а Великобританія втратила цю перевагу. Тому, дедалі більше міжнародних компаній переносять свої європейські штаб-квартири з Лондона до Дубліна. Таким чином, Республіка Ірландія може стати привабливим середовищем для технологічних стартапів.

Республіка Ірландія є одним із лідерів у галузі штучного інтелекту завдяки ефективній взаємодії між академічними колами та промисловістю. Згідно з даними, ірландська держава посідає 10 місце серед 54 країн і 3 місто в Європі за рівнем розвитку ШІ в таких аспектах, як реалізація, інновації та інвестиції. В Республіці Ірландія спостерігається зростаючий попит на технології зі ШІ в різних секторах економіки, включно з бізнесом, промисловістю та державним сектором. Згідно з дослідженням, проведеним у 2019 р., майже 40% компаній уже використовують технології зі ШІ, а понад 50% планували впровадити їх до 2024 р. [18].

У країні функціонують центри, що спеціалізуються на дослідженнях у сфері ШІ. Наприклад, компанія «ADAPT» являє собою центр передового досвіду у сфері цифрового контенту і базується в Трініті-коледжі в Дубліні. Крім того, компанія «Insight» є одним із найбільших центрів аналітики даних у Європі та має представництва в чотирьох провідних університетах Республіки Ірландія. Уряд ірландської держави активно інвестує в розвиток галузі ШІ, приділяючи особливу увагу дослідженням і розробкам, залученню висококваліфікованих фахівців і створенню сприятливих умов для стартапів. Крім того, у країні діють суворі законодавчі норми, що регулюють захист даних і бізнес-політику, що робить її привабливою для компаній, які працюють у сфері ШІ.

Мета статті. Головна мета дослідження полягає у всебічному та комплексному аналізі тенденцій, потенціалу та перспектив розвитку штучного інтелекту в Республіці Ірландія.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. Наразі інформація про тенденції, потенціал і перспективи розвитку штучного інтелекту (ШІ) в Республіці Ірландія представлена у вигляді окремих наукових досліджень. Більшість ключових документів, що стосуються розвитку ШІ в Республіці Ірландія, були розроблені протягом останнього десятиліття і доступні для вивчення. Однак в умовах стрімкого розвитку ШІ бракує їхнього всебічного та цілісного наукового аналізу. Сьогодні констатується відсутність комплексних досліджень, які б систематизували та проаналізували загальний розвиток політики Республіки Ірландія у сфері розвитку штучного інтелекту.

Попри те, що в українській політичній науці тема розвитку ШІ викликає значний інтерес у дослідників, розвиток ШІ в Республіці Ірландія залишається маловивченим. Дане дослідження спрямоване на заповнення цієї прогалини і є новаторським в Україні всебічним дослідженням проблем і перспектив розвитку ШІ в Республіці Ірландія. У сфері наукових досліджень, пов'язаних з інформаційною безпекою Республіки Ірландія, можна виокремити значну кількість праць учених з Республіки Ірландія, Великої Британії, ЄС та США. Серед найбільш значущих робіт у цій галузі слід виділити дослідження таких учених, як Ірфан М., Мюррей Л., Алдулайлан Ф., Алькахтані Ю., Латіф Ф., Лінч М., Макінтайр Т., Мінделл Д., Автор Д., Рейнджлдс Е., Ньюенхем П., Пейп М., Зуніга Г., Гоянес М., Дуротойе Т.

Важливий внесок у дослідження ШІ в Республіці Ірландія зробила міжнародна група дослідників з Лімерікського університету, що є найбільшим ірландським університетом, розташованим у місті Лімерік у західній частині країни. До складу групи увійшли Ірфан М., Мюррей Л., Алдулайлан Ф., Алькахтані Й. і Латіф Ф. У своїй науковій праці «Сентименти і дискурси: Як Ірландія сприймає штучний інтелект» автори розглядають складну діалектику страху та надії, яка виявляється в суспільному сприйнятті ШІ в Республіці Ірландія. Попри побоювання, пов'язані з безпекою робочих місць, конфіденційністю, контролем, впливом на суспільство та етичними проблемами, існує також оптимізм щодо потенціалу ШІ для революції у сфері охорони здоров'я, підвищення ефективності державного управління, розширення доступу до освіти, поліпшення якості життя та стимулювання інновацій. Розуміння цих перспектив має вирішальне значення для розроблення обґрунтованої політики і стратегій розвитку ШІ, що відповідають суспільним цінностям і прагненням. Зрештою, для успішної інтеграції ШІ в суспільство необхідний підхід, що враховує регіональні особливості та підкріплений етичними міркуваннями [22].

У рамках останніх досліджень, що присвячені розвитку ШІ в Республіці Ірландія представляє інтерес наукова праця ірландських учених М. Лінча і Л. Девіс під назвою «Штучний інтелект: передісторія та огляд поточної нормативно-правової бази в Ірландії та ЄС». У цьому дослідженні автори роблять спробу дати всебічне уявлення про штучний інтелект і розглянути політичні та нормативні підходи до його застосування в Республіці Ірландія та ЄС. На початку роботи описуються основні терміни і види штучного інтелекту, а потім коротко розглядаються потенційні переваги і ризики впровадження цієї технології в різних сферах життя ірландської держави. Автори детально аналізують використання технологій ШІ та політичний підхід до нього в Республіці Ірландія. Насамкінець розглядається історія питання та розвиток першого міжнародного нормативного акта, що регулює штучний інтелект: «Закону ЄС про штучний інтелект» 2024 р. [23].

Виклад основного матеріалу. На сьогоднішній день не існує єдиного визначення штучного інтелекту (ШІ). В цілому, ШІ являє собою технологію, здатну виконувати завдання, які раніше вважалися виключно людськими. Наприклад, ШІ визначається як «здатність нелюдських машин або штучних істот виконувати завдання, спілкуватися, взаємодіяти і діяти логічно, подібно до біологічних людей» [32].

У 2018 р. Європейська комісія дала таке визначення ШІ: «Штучний інтелект являє собою системи, здатні демонструвати розумну поведінку, аналізувати навколишнє середовище та вживати заходів для досягнення певних цілей із деяким ступенем автономності. Системи на основі ШІ можуть бути суто програмними, що діють у віртуальному світі (наприклад, голосові помічники, програми для аналізу зображень, пошукові системи, системи розпізнавання мови та облич), або ж ШІ може бути вбудований в апаратні пристрої (наприклад, вдосконалені роботи, автономні автомобілі, безпілотники або додатки Інтернету речей)» [6].

Група експертів високого рівня зі штучного інтелекту, створена Європейською комісією, у 2019 р. розширила визначення поняття «штучний інтелект» і сформулювала його таким чином: «Системи штучного інтелекту – це розроблені людиною програмні (а можливо, й апаратні) системи, які, поставивши перед собою складну мету, діють у фізичному або цифровому вимірі, сприймаючи навколишнє середовище шляхом збирання даних, інтерпретуючи зібрані структуровані або неструктуровані дані, мірюючи на основі знань або опрацьовуючи інформацію, отриману з цих даних, та ухвалюючи рішення

щодо найкращої дії (дій) для досягнення поставленої мети. Системи штучного інтелекту можуть або використовувати символічні правила, або навчатися числової моделі, а також адаптувати свою поведінку, аналізуючи, як на навколишнє середовище впливають їхні попередні дії. Як наукова дисципліна, штучний інтелект охоплює кілька підходів і методів, таких як машинне навчання (конкретними прикладами якого є глибоке навчання і навчання з підкріпленням), машинне мислення (яке охоплює планування, складання розкладів, представлення знань і міркування, пошук і оптимізацію) та робототехніка (що охоплює керування, сприйняття, датчики і виконавчі механізми, а також інтеграцію всіх інших методів у кіберфізичні системи)» [1].

Зовсім недавно, у 2024 р., Організація економічного співробітництва та розвитку (ОЕСР) ухвалила переглянуте визначення системи ШІ. У поточній версії Рекомендації Ради ОЕСР зі штучного інтелекту система ШІ визначається таким чином: «Система ШІ – це машинна система, яка для досягнення явних або неявних цілей визначає на основі отриманих вхідних даних, як генерувати вихідні дані, зокрема прогнози, контент, рекомендації або рішення, що можуть впливати на фізичне або віртуальне середовище». Різні системи ШІ відрізняються рівнем автономності та адаптивності після впровадження. Рекомендація Ради зі штучного інтелекту ОЕСР, також відома як «Принципи ШІ ОЕСР», є «міжурядовим стандартом з ШІ» і наразі налічує 47 учасників, серед яких Республіка Ірландія та ЄС [28].

Машинне навчання, що є частиною штучного інтелекту, являє собою програмне забезпечення, здатне навчатися на основі наявних даних і покращувати свої алгоритми без явного програмування з боку людини. Штучний інтелект є частиною комплексу цифрових технологій, які в найближчі десятиліття відіграватимуть важливу роль у формуванні глобальної конкурентоспроможності та продуктивності праці. Ті, хто освоїть ці технології першими, отримають значні соціальні, економічні та стратегічні переваги. ШІ та інші цифрові технології мають значний вплив на ринок праці. За словами одного з експертів у сфері розвитку ШІ, «майбутнє штучного інтелекту – це майбутнє роботи» [25].

В Республіці Ірландія налічується понад 200 компаній, які активно використовують технології штучного інтелекту. Ці компанії, як великі, так і невеликі, роблять значний внесок у розвиток інновацій у сфері ШІ, що робить Республіку Ірландія центром технологічних досягнень. Однак різноманітність галузей, в яких працюють ці компанії, також є відмінною рисою Республіки Ірландія. Від охорони здоров'я до фінансових технологій, від виробництва до сільського господарства – можна знайти безліч прикладів застосування ШІ для розв'язання складних завдань і оптимізації процесів. Програми технічної освіти в країні відіграють важливу роль у цьому розмаїтті сфер застосування ШІ. Університети і технічні інститути по всій Ірландії пропонують спеціалізовані курси зі ШІ, навчаючи наступне покоління фахівців необхідних навичок для досягнення успіху і впровадження інновацій у цій галузі.

В Республіці Ірландія також існують дослідницькі центри, що спеціалізуються на ШІ. Ці центри відіграють важливу роль у розробці та тестуванні нових технологій у галузі штучного інтелекту. Вони сприяють співпраці між науковими колами, промисловістю та урядом, створюючи сприятливе середовище для інновацій у сфері штучного інтелекту. Крім того, уряд Республіки Ірландія активно регулює сферу ШІ. Він забезпечує розробку і використання технологій штучного інтелекту відповідно до етичних принципів, захищаючи інтереси як приватних осіб, так і компаній [24].

Нині етичний штучний інтелект є не просто концепцією, а ключовим елементом відповідального розроблення і застосування технологій штучного інтелекту. Дискусії про етику штучного інтелекту стосуються принципів прозорості, справедливості, недискримінації, конфіденційності та безпеки. Йдеться про необхідність забезпечення підзвітності штучного інтелекту та створення засад для прийняття етичних рішень. Розуміння етичності штучного інтелекту має вирішальне значення, особливо в умовах сучасної цифрової епохи, коли системи штучного інтелекту все більше інтегруються в повсякденне життя людей. Ці системи можуть ухвалювати рішення, які мають значний вплив на окремих людей і суспільство загалом, тому забезпечення етичності таких рішень має першорядне значення.

Республіка Ірландія прагне створення етичного штучного інтелекту, розробляючи стандарти та заходи для забезпечення відповідності вимогам. Республіка Ірландія усвідомлює, що етичний штучний інтелект передбачає як наявність керівних принципів і правил, так й їх дотримання. Це включає формування культури відповідальності та етичного прийняття рішень у галузі ШІ. Серед ключових аспектів етичного ШІ можна назвати такі: 1. *Прозорість*. Системи ШІ мають функціонувати прозоро; 2. *Справедливість*. Рішення, що приймаються штучним інтелектом, мають бути справедливими та неупередженими; 3. *Недискримінація*. ШІ не повинен дискримінувати чи виявляти упередженість; 4. *Конфіденційність*. Слід поважати приватне життя окремих осіб; 5. *Безпека*. Системи ШІ повинні бути надійними та безпечними у використанні [12].

В умовах активного розвитку штучного інтелекту необхідно формувати культуру відповідальності за його використання. Відповідальність за використання ШІ – це не разове завдання, а постійне

зобов'язання. Компанії повинні заохочувати відповідальне використання ШІ, чітко інформуючи про його наслідки та потенційні ризики. Регулярні програми навчання та підвищення обізнаності можуть допомогти сформувати почуття відповідальності. Організації повинні застосовувати запобіжний підхід до вирішення проблем, пов'язаних із дотриманням нормативних вимог. Це передбачає проведення регулярних перевірок систем ШІ, виявлення потенційних ризиків та вжиття необхідних запобіжних заходів. Важливо не лише реагувати на проблеми після їх виникнення, а й запобігати їм. Зацікавлені сторони, включаючи розробників ШІ, користувачів та регулюючі органи, повинні працювати спільно, щоб забезпечити етичне використання ШІ. Відкритий діалог може призвести до кращого розуміння та ефективніших стратегій [11].

У контексті розвитку ШІ в Республіці Ірландія необхідно приділити особливу увагу питанням етики. Майбутнє етичного ШІ в країні залежатиме від постійного вдосконалення та дотримання встановлених протоколів. В епоху, коли ШІ стає домінуючою силою, підхід Республіки Ірландія має бути гнучким, динамічним та обґрунтованим, щоб відповідати швидкому розвитку технологій. Одним із ключових аспектів є реалізація освітніх ініціатив у галузі штучного інтелекту. Необхідно інформувати не лише фахівців у галузі технологій, а й широку громадськість про етичні аспекти використання ШІ. Розуміння принципів роботи ШІ дозволить людям приймати зважені рішення про його використання та сприяти створенню середовища, яке заохочуватиме етичне застосування технологій [11].

Заходи забезпечення конфіденційності даних є важливим аспектом розвитку етичного штучного інтелекту. З розвитком технологій штучного інтелекту з'являтимуться нові загрози конфіденційності. У зв'язку з цим Республіка Ірландія має забезпечити надійність своїх заходів щодо захисту даних та їх здатність протистояти новим загрозам. У майбутньому підхід Республіки Ірландія до розвитку етичного штучного інтелекту, ймовірно, включатиме: розширення та вдосконалення освітніх програм у галузі ШІ; посилення заходів щодо захисту персональних даних; заохочення співпраці між експертами в галузі технологій та етики; підвищення обізнаності громадськості та залучення її до обговорення питань етики штучного інтелекту [11].

Хоча точні дані про використання штучного інтелекту в Республіці Ірландія складно назвати, є інформація, яка дає змогу скласти уявлення про те, як ця технологія стає дедалі більш поширеною в країні. Центральне статистичне управління (англ. The Central Statistics Office, CSO) випускає серію статистичних даних під назвою «Статистика інформаційного суспільства», яка вимірює низку характеристик використання інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) та ШІ у побуті та на робочому місці. У рамках цієї серії щорічно проводять опитування приблизно 4 тис. підприємств зі штатом понад 10 осіб, під час якого збирають інформацію про використання ІКТ та ШІ на цих підприємствах [16].

У 2023 р. опитування охоплювало малі, середні та великі підприємства і показало, що великі підприємства становлять найбільшу групу користувачів ШІ: 37 % з них використовували технології ШІ, порівняно з 18 % середніх і 5 % малих підприємств. Дослідження також показало, що найчастіше технології ШІ використовують у всіх трьох групах підприємств для автоматизації робочих процесів або допомоги в ухваленні рішень. У 2023 р. 8 % опитаних підприємств заявили, що тією чи іншою мірою використовують технології ШІ. Підприємства з чисельністю 10 осіб і більше відповідають середньому показнику по ЄС, який, згідно з Євростатом, також становить 8%. Як і в Республіці Ірландія, великі підприємства в ЄС становлять найбільшу групу, що використовує технології ШІ (30,4%), порівняно з усього 6,4% на малих підприємствах. Найбільш використовуваною технологією була автоматизація різних робочих процесів, яка склала 3%, тоді як аналіз письмової мови склав 2,9% [10].

Бізнес-школа Трініті-коледжу в Дубліні на замовлення компанії «MicrosoftIreland» підготувала звіт про генеративний штучний інтелект в Республіці Ірландія. У рамках дослідження було опитано 400 керівників вищої ланки з державного та приватного секторів. Основні висновки звіту компанії «MicrosoftIreland»: 49 % опитаних організацій використовують генеративний штучний інтелект у тій чи іншій формі. 47 % респондентів вважають, що ця технологія підвищить продуктивність. Також було встановлено, що транснаціональні компанії використовують генеративний штучний інтелект на 30 % частіше, ніж місцеві ірландські компанії. Це може бути пов'язано з великою кількістю технологічних компаній зі штаб-квартирою в Республіці Ірландія. Звіт також вказує на виникнення тіньової культури генеративного штучного інтелекту, коли загальнодоступні споживчі інструменти використовуються співробітниками у своїй роботі в порушення трудової політики [15].

У червні 2024 р. ірландська компанія «PwC» презентувала результати дослідження «Опитування керівників бізнесу щодо використання генеративного штучного інтелекту» (англ. Generative Artificial Intelligence, Business Leaders Survey), в рамках якого ірландські керівники оцінили вплив, приналежність і плани щодо використання генеративного штучного інтелекту у своїх організаціях. Хоча «значна більшість респондентів (83 %) очікують, що генеративний ШІ матиме істотний вплив на їхній бізнес

упродовж наступних п'яти років», лише 7 % повідомили про значне впровадження технологій штучного інтелекту в кількох галузях [17].

У листопаді 2023 р. компанія «LinkedIn», що займається наданням послуг у сфері зайнятості та соціальних медіа, яка належить нині компанії «Microsoft», опублікувала звіт під назвою «Звіт про майбутнє праці: штучний інтелект у дії». Звіт ґрунтується на висновках ринку праці, прийнятих від платформи, що складається з 1 млрд. професіоналів і 67 млн. співробітників. Основна увага в доповіді приділялася Австралії, Бразилії, Франції, Німеччині, Індії, США, Великобританії та Республіці Ірландія. Деякі з ключових висновків зі звіту включали те, що кількість розмов про ШІ збільшилася приблизно на 70%, що відбулося значне збільшення таких термінів, як «ChatGPT», і що ми перебуваємо в «періоді швидкої і безперервної зміни навичок, необхідних для виконання нашої роботи» [13].

11 червня 2024 р. Міністерством фінансів і Міністерством підприємництва, торгівлі та зайнятості Республіки Ірландія було опубліковано три доповіді під загальною назвою «Штучний інтелект: друг чи ворог». Доповіді включають в себе: «Штучний інтелект: друг чи ворог? Резюме та міркування державної політики»; «Штучний інтелект: Друг чи ворог? Огляд того, як штучний інтелект може вплинути на економіку Ірландії»; «Штучний інтелект: Друг чи ворог? Аналіз того, як штучний інтелект може вплинути на ринок праці Ірландії» [3].

Ця серія доповідей є стислим викладом основних висновків про потенційний вплив ШІ на економіку і ринок праці Республіки Ірландія. У доповіді наголошується, що системи ШІ здатні мати значний вплив на бізнес, працівників і суспільство в цілому. Також вказується, що розвиток обчислювальної техніки означає, що ШІ може впливати не тільки на рутинні, а й на когнітивні завдання. Вплив ШІ на ринок праці полягатиме не тільки в автоматизації, а й у підвищенні продуктивності праці, водночас цей вплив не буде рівномірним і різнитиметься за демографічними групами. У доповіді також рекомендується, що ключова мета політики повинна полягати у використанні переваг нових технологій, уникаючи при цьому виникнення цифрового розриву і шкоди для інших політичних цілей. Крім того, підкреслюється необхідність забезпечення того, щоб Республіка Ірландія не брала участі в конкурентній боротьбі за зниження цін на міжнародному рівні [3].

Ринок штучного інтелекту в Республіці Ірландія демонструє значне зростання завдяки широкому впровадженню цифрових технологій і розвитку онлайн-сервісів. Очікується, за прогнозами ірландської компанії «Statista», що у 2025 р. обсяг ринку ШІ в Республіці Ірландія становитиме 1,43 млрд. доларів США. Середньорічний темп зростання ринку ШІ в Республіці Ірландія прогнозується на рівні 27,51%, що дасть змогу досягти обсягу ринку в розмірі 4,82 млрд. доларів США до 2030 р. Світовим лідером за обсягом ринку ШІ у 2025 р. стануть США, де обсяг ринку становитиме 66,21 млрд. доларів США. Зростання ринку ШІ в Республіці Ірландія також зумовлене підвищенням обізнаності населення щодо переваг ШІ в різних галузях, а також досягненнями в таких сегментах, як робототехніка, автономні технології, комп'ютерний зір, машинне навчання, обробка природної мови та генеративний штучний інтелект. Високі темпи зростання ринку ШІ в Республіці Ірландія пояснюються попитом на рішення на основі ШІ в різних галузях, а також ініціативами уряду щодо стимулювання інновацій та цифровізації [5].

Отже, в Республіці Ірландія спостерігається тенденція до активного впровадження ШІ в різні сфери діяльності. Це зумовлено високим рівнем цифрової та технологічної грамотності населення країни. У результаті спостерігається значне зростання попиту на рішення, засновані на штучному інтелекті, в таких галузях, як охорона здоров'я, державні послуги, фінанси та інші. Також варто зазначити, що останнім часом спостерігається тенденція до ширшого використання штучного інтелекту компаніями для аналізу даних про клієнтів і надання більш персоналізованих послуг. Це свідчить про зростаючу значущість прийняття рішень на основі даних і потенціал штучного інтелекту для революційних змін у традиційних бізнес-процесах [5].

В Республіці Ірландія спостерігається зростання попиту на чат-боти і віртуальних помічників на основі штучного інтелекту, особливо у фінансовому та роздрібному секторах. Ця тенденція зумовлена необхідністю надання клієнтам більш ефективного і персоналізованого обслуговування, а також прагненням компаній знизити витрати. Крім того, ШІ дедалі частіше використовується для прогнозної аналітики в охороні здоров'я, що дає змогу поліпшити результати лікування пацієнтів і скоротити витрати на медицину. Ці тенденції мають велике значення для представників галузі, оскільки вони вказують на потенціал штучного інтелекту в сфері трансформації традиційних бізнес-моделей і підвищення ефективності діяльності. Однак існують побоювання з приводу етичних наслідків використання ШІ та його впливу на ринок праці. Отже, необхідно провести ретельний аналіз і розробити заходи щодо впровадження штучного інтелекту в Республіці Ірландія [5].

На зростання ринку ШІ в Республіці Ірландія значною мірою впливають макроекономічні чинники, як-от технологічний прогрес, державна підтримка та інвестиції в дослідження і розробки. Сильна

економіка Республіки Ірландія та сприятливе ділове середовище залучили великих гравців у сфері штучного інтелекту, що призвело до значного зростання ринку. Крім того, інвестиції Республіки Ірландія в інфраструктуру та ініціативи з просування інновацій та підприємництва сприяли подальшому розвитку ринку. Також варто відзначити зростаюче впровадження технологій штучного інтелекту в різних галузях і збільшення попиту на автоматизацію та підвищення ефективності, що стимулює розвиток ринку в Республіці Ірландія [5].

Загалом, можна зробити висновок, що в Республіці Ірландія спостерігається активний розвиток ринку ШІ, що зумовлено наявністю в країні сприятливих умов для розвитку технологій та інновацій. Уряд Республіки Ірландія активно інвестує в розвиток цієї галузі, приділяючи особливу увагу дослідженням і розробкам, залученню висококваліфікованих фахівців і створенню сприятливих умов для стартапів. Крім того, суворі закони про захист даних і політика, спрямована на підтримку бізнесу, роблять Республіку Ірландія привабливим місцем для компаній, що працюють у сфері ШІ. Завдяки цьому поєднанню чинників Республіка Ірландія стала одним із лідерів на світовому ринку ШІ з великим потенціалом для подальшого розвитку.

Як на європейському, так і на міжнародному рівні Республіка Ірландія посідає лідируючі позиції у сфері розвитку технологій. Низька ставка корпоративного податку в Республіці Ірландія, а також її статус єдиної англомовної юрисдикції загального права в ЄС і розвинене нормативно-правове середовище сприяють залученню інвестицій у сферу ШІ. Наразі управління ШІ регулюється чинними законами Республіки Ірландія. Крім того, у національній стратегії уряду Республіки Ірландія у сфері ШІ «ШІ – на благо: національна стратегія у сфері штучного інтелекту для Ірландії» викладено, як Республіка Ірландія може стати міжнародним лідером у використанні ШІ на благо економіки і суспільства. Будучи державою-членом ЄС, Республіка Ірландія повинна буде ухвалити закони, що відповідають регламенту ЄС у сфері ШІ [20].

Наразі в Республіці Ірландія немає спеціального законодавства щодо ШІ. Однак існує кілька різних законодавчих актів, які можуть забезпечити певний захист осіб, які постраждали від використання та впровадження ШІ. Законодавство в галузі ШІ в Республіці Ірландія перебуває на стадії розвитку. Уряд визнає, що потенціал ШІ може бути повністю реалізований тільки за наявності надійного законодавства. Уряд намагається знайти баланс між просуванням інновацій та забезпеченням дотримання етичних норм.

«Закон про захист даних» Республіки Ірландія (англ. Data Protection Act, DPA) 2018 р. [8] і «Загальне положення про захист даних» ЄС (англ. General Data Protection Regulation, GDPR) [14] – це два чинні закони, які застосовуються до додатків на основі ШІ, особливо до тих, які пов'язані з персональними даними. Також, ключову роль відіграють регулюючі органи. Комісія із захисту даних (англ. The Data Protection Commission, DPC) – це ключовий регулювальний орган, який відповідає за дотримання «Загального положення про захист даних» ЄС і здійснює нагляд за аспектами захисту даних у сфері ШІ [9]. Регулюючі органи стежать за тим, щоб розробки у сфері ШІ відповідали принципам захисту даних, таким як мінімізація даних, точність і прозорість.

Нині спостерігається зростання розуміння і довіри до потенціалу штучного інтелекту (ШІ) серед населення. У зв'язку з цим уряд Республіки Ірландія усвідомлює необхідність активної взаємодії з суспільством з питань розроблення, управління та використання ШІ. Беручи до уваги важливість цього питання, уряд Республіки Ірландія розробив і ухвалив у 2021 р. «Національну стратегію штучного інтелекту для Ірландії» (англ. A National Artificial Intelligence Strategy for Ireland). Мета цієї стратегії – зміцнити суспільну довіру до ШІ як до інструменту, здатного принести користь суспільству в країні [2].

Для досягнення цієї мети зроблено такі кроки: Призначено посла в галузі ШІ з метою популяризації ШІ як позитивного чинника для економіки та суспільства; Організовано діалог з дітьми та молоддю на тему ШІ через національну структуру для консультацій з молоддю; Просуваються і розширюються курси з навчання населення технологій штучного інтелекту; Збільшуються цільові фонди, спрямовані на використання ШІ на благо суспільства; Включаються можливості ШІ в кліматичну діяльність під час розроблення майбутньої кліматичної політики; Приділяється особлива увага правам людини й етичним принципам; Враховуються різноманітність, інклюзивність, рівність і недискримінація при впровадженні ШІ в суспільство; Використовується потенціал ШІ для розв'язання соціальних, екологічних та економічних проблем. Відтак, уряд Республіки Ірландія ініціював процес формування та зміцнення довіри до ШІ серед громадян за допомогою цих заходів [2].

У «Національній стратегії штучного інтелекту для Ірландії» представлено комплексну програму і комплекс стратегічних заходів, спрямованих на те, щоб допомогти уряду реалізувати своє бачення Республіки Ірландія як міжнародного лідера в галузі використання штучного інтелекту на благо населення. Стратегія орієнтована на людей і передбачає етичний підхід до розробки, впровадження та

використання штучного інтелекту. «Національна стратегія штучного інтелекту для Ірландії» є важливою частиною загальної цифрової стратегії Республіки Ірландія [3]. Чинники, що сприяють розвитку ШІ, аналогічні тим, які діють щодо інших цифрових технологій. Тому стратегія розвитку ШІ має реалізовуватися в рамках структури, створеної урядом для стимулювання переходу Ірландії на цифрові технології [26].

Для нагляду за реалізацією «Національної стратегії штучного інтелекту для Ірландії» у 2021 р. було також створено «Консультативну раду з цифрових технологій для підприємств» (англ. Enterprise Digital Advisory Board). До складу ради увійшли представники державних відомств, багатонаціональні підприємства (англ. Multinational Enterprises), експерти зі штучного інтелекту, малі та середні підприємства, Управління з промислового розвитку (англ. Industrial Development Authority, IDA) і компанія «Enterprise Ireland». Головою ради став державний міністр з розвитку торгівлі, цифрових технологій та регулювання діяльності компаній. Діяльність ради спрямована на контроль за реалізацією підприємницьких елементів стратегії штучного інтелекту (ШІ). Рада консультуватиме і співпрацюватиме з урядом з метою стимулювання впровадження ШІ на підприємствах [2].

Для досягнення цієї мети «Консультативна рада з цифрових технологій для підприємств» виконуватиме такі функції: 1. Оцінка поточного спектра ресурсів ШІ, доступних для промисловості від технологічних центрів і відповідних агентств; 2. Розроблення програми ШІ для підприємств, що містить цільові заходи фінансування, а також діагностичні інструменти та інші консультаційні послуги з питань упровадження ШІ; 3. Підвищення обізнаності підприємств усіх розмірів – від малих і середніх підприємств до великих багатонаціональних підприємств – щодо ресурсів, які надають європейські центри цифрових інновацій та передового досвіду; 4. Розроблення національних програм для підприємств; 5. Розроблення національної програми для підприємств [2].

Відповідно до «Національної стратегії розвитку штучного інтелекту для Ірландії» було створено «Інноваційний центр штучного інтелекту» (англ. AI Innovation Hub). Він став ключовим центром у сфері штучного інтелекту, надаючи підприємствам експертні знання та рекомендації щодо впровадження технологій штучного інтелекту. «Інноваційний центр ШІ» є одним із чотирьох європейських цифрових інноваційних центрів національного рівня в Республіці Ірландія. «Інноваційний центр ШІ» було створено в рамках загальноєвропейської мережі, яка почала роботу в травні 2021 р. «Інноваційний центр ШІ» надає послуги з підвищення кваліфікації, інновацій та консультування підприємствам і державним органам. Зокрема, він допомагає в дотриманні стандартів, захисті даних і нормативних вимог у галузях, пов'язаних зі штучним інтелектом. Крім того, Центр орієнтований на надання доступу до технічного досвіду, досліджень, обладнання та експериментів. Центр також надає доступ до інфраструктури, технологій і випробувальних проектів для малого та середнього бізнесу [2].

Зміцнення суспільної довіри до ШІ та підвищення залученості в його використання матиме ключове значення для успішної реалізації «Національної стратегії розвитку штучного інтелекту для Ірландії». З метою підвищення обізнаності громадськості та бізнесу про потенціал штучного інтелекту уряд призначив посла штучного інтелекту. Посол ШІ виступає захисником штучного інтелекту як позитивної сили для економіки і суспільства. Посол ШІ є також членом «Консультативної ради з цифрових технологій для підприємств» і отримує підтримку у своїй роботі від Ради та Департаменту підприємництва, торгівлі та зайнятості Республіки Ірландія [2].

У рамках стимулювання впровадження ШІ в державну службу у 2021 р. уряд Республіки Ірландія створив «Раду з впровадження державних технологій» (англ. GovTech Delivery Board), яка відповідає за цифрову трансформацію державної служби. У межах своєї діяльності Рада розглядатиме питання впровадження ШІ в державну службу. Для зміцнення міжнародного лідерства Республіки Ірландія в галузі розроблення стандартів ШІ було створено групу «Команда найкращих фахівців зі стандартів для ШІ» (англ. Top Team on Standards for AI). Очолювана «Національним управлінням зі стандартизації Ірландії» (National Standards Authority of Ireland, NSAI), група працює з науковими колами, промисловістю та регулювальними органами над розробленням дорожньої карти для стандартів штучного інтелекту [2].

Передбачається, що «Національна стратегія розвитку штучного інтелекту для Ірландії» буде гнучкою та оперативною, щоб відповідати технологіям, що швидко розвиваються, і проблемам, які вона повинна вирішувати. У міру розвитку технологій штучного інтелекту можуть знадобитися нові підходи та ініціативи, які важко передбачити сьогодні. Щоб забезпечити оперативність, уряд ірландської держави розробив детальний план дій щодо реалізації стратегії, який щорічно оновлюватиметься з урахуванням проблем і можливостей, що виникають.

«Науковий фонд Ірландії» (англ. Science Foundation Ireland, SFI) – агентство, що підтримує наукові дослідження в країні, фінансує шість центрів, що займаються дослідженнями в галузі штучного інтелекту. До цих центрів належать: «ADAPT» – центр передового досвіду в галузі цифрового контенту,

розташований у Трініті-коледжі в Дубліні; «Insight» – один із найбільших центрів аналізу даних у Європі, розташований у чотирьох провідних університетах Республіки Ірландія. Приклади зростаючої активності в галузі штучного інтелекту в Республіці Ірландія можна знайти на веб-сайті «Наукового фонду Ірландії» [4].

У відповідь на зростаючий попит на фахівців у сфері досліджень штучного інтелекту, «Науковий фонд Ірландії» і його галузеві та академічні партнери створили «Центр дослідницької підготовки в галузі штучного інтелекту» (англ. Centre for Research Training in Artificial Intelligence) в Університетському коледжі Корка. Цей центр є національним центром Республіки Ірландія з підготовки фахівців у галузі штучного інтелекту на рівні докторантури [30]. Слід зазначити, що між Республікою Ірландія та США існують міцні зв'язки у сфері штучного інтелекту, які розширюються. Світові лідери в цій галузі, такі як «Amazon», «Cisco», «Intel», «IBM», «J&J», «LinkedIn», «Microsoft», створили локальні дослідницькі центри з активною участю в науковій діяльності Ірландії та її мережі дослідницьких установ. Республіка Ірландія активно розвиває співпрацю з державними дослідницькими центрами в США [18].

В Республіці Ірландія понад два десятиліття ведеться робота зі створення фундаменту, який дасть змогу скористатися перевагами машинного навчання і великих мовних моделей. Сьогодні прискорені обчислення і генеративний штучний інтелект досягли переломного моменту. Попит на ці технології зростає в усьому світі серед компаній, галузей і країн. Сьогодні поняття «штучний інтелект» зазнало переосмислення. У широкому сенсі під ШІ розуміють усе, що імітує поведінку людини. Однак насправді ШІ являє собою систему, здатну навчатися на основі досвіду, отриманого від людини.

Порівняно з іншими розвиненими країнами, Республіка Ірландія має значний досвід у галузі штучного інтелекту. Система освіти щорічно випускає 1500 магістрів. Центри підготовки дослідників «Наукового фонду Ірландії», розташовані в різних університетах країни, за чотири роки з 2019 р. підготували від 600 до 700 докторів наук, що фактично подвоїло кількість вчених, які випускаються з Ірландії [29]. Крім того, згадувані вище, центри «Наукового фонду Ірландії», що спеціалізуються на штучному інтелекті, ірландський глобальний центр інновацій в галузі цифрових контент-технологій «ADAPT» та один з найбільших центрів аналітики даних у Європі, розташований в Ірландії «Insight», також готують фахівців, які мають навички у сфері ШІ.

Республіка Ірландія стала першою країною у світі, яка розробила галузеву загальнонаціональну програму магістратури зі штучного інтелекту. Крім того, в Республіці Ірландія один із найвищих показників кількості стипендіатів «Європейської асоціації зі штучного інтелекту» на душу населення. Унікальність Республіки Ірландія полягає в тому, що, будучи відносно невеликою країною, ірландці можуть підтримувати особисті зв'язки та ефективно співпрацювати, зберігаючи можливість для індивідуального розвитку кожного жителя [7].

В Республіці Ірландія виділяється чотири основні напрямки діяльності у галузі штучного інтелекту. Перше з них включає великих технологічних гравців, таких як «Microsoft», «Meta», «IBM» і «Alphabet», материнська компанія «Google». Інтерес цих компаній до співпраці з центром «Insight» багато в чому обумовлений кадровим потенціалом, оскільки багато випускників, магістрантів, докторантів та постдокторантів центру «Insight» згодом працевлаштовуються в ці великі компанії. Проте співробітництво здійснюється і в інших сферах. Компанія «OpenAI», яка є розробником «ChatGPT», відкрила представництво в Дубліні наприкінці 2023 р. Директор зі стратегії компанії «Microsoft» Дж. Квон, який відвідав Дублін, висловив захоплення технічними талантами, доступними в Республіці Ірландія. Компанія «Microsoft» також висловила захоплення країною, заявивши, що вона знаходиться на світовій арені в галузі штучного інтелекту. М. Снапп, віце-президент компанії зі стратегічних ініціатив, зазначила, що промисловість Республіки Ірландія, її привабливість для іноземних інвестицій та можливості роблять її лідером у ЄС, США та в усьому світі [19].

Другий напрямок діяльності у сфері штучного інтелекту в Республіці Ірландія пов'язаний із транснаціональними корпораціями, які вивчають можливості застосування ШІ. Серед компаній, що працюють в Республіці Ірландія і мають центри передового досвіду в галузі ШІ, можна виділити «Accenture», «Siemens», «Zalando», «SAP», «HubSpot», «DeutscheBank», «AmazonWebServices», «Salesforce», «FidelityInvestments», «Ericsson», «Mastercard», «Stryker», «BostonScientific», «Qualcomm», «AMD», «AnalogDevices», «GM», «Valeo» [19].

Третя сфера застосування штучного інтелекту пов'язана з ірландськими організаціями, такими як Управління охорони здоров'я, Морський інститут та Гельсько-Ірландська атлетична асоціація. Ці організації прагнуть цифрової трансформації, і штучний інтелект стає очевидним помічником на цьому шляху [19].

І, нарешті, четвертий напрямок діяльності у сфері ШІ – це університетські стартапи, пов'язані з дослідженнями у суміжних зі ШІ областях, таких як автоматизація, аналіз даних та машинне навчання.

Один із прикладів компанія, яка фокусується на технологіях у сфері охорони здоров'я – «DigitalGaitLabs», яка розробила додаток «GaitKeeper», який використовує відео та біомаркери для визначення характеристик ходи людини. Додаток допомагає визначити, чи потребує людина лікування. Технологія ґрунтується на багаторічних дослідженнях у галузі комп'ютерного зору та аналізу рухів. У 2020 р. компанія «Apple» придбала «Voysis», ірландську компанію, що розробила технологію, яка допомагає цифровим голосовим помічникам краще розуміти природну мову. Вважається, що ця технологія тепер є частиною віртуального помічника «Apple Siri» зі штучним інтелектом. Засновник «Voysis» П. Кехілл більше 15 років займався дослідженнями в галузі мовних технологій та нейронних мереж. До того, як «Voysis» була придбана, вона зробила великий прорив, переманивши до себе одного з провідних інженерів «Google» [19].

Ще одна компанія, заснована на використанні штучного інтелекту і яка зародилася в ірландському університеті, – «Soapbox Labs». Вона розробила голосову технологію з урахуванням штучного інтелекту для дітей. Наприкінці 2023 р. американська компанія «Curriculum Associates», що спеціалізується на розробці освітніх технологій, придбала цю компанію. «Intercom» – ірландський стартап, який у 2018 р. досяг оцінки 1 млрд. доларів, що робить його лідером. Компанія активно працює у сфері штучного інтелекту. У 2023 р. вона запустила комбінований чат-бот, службу підтримки та інструмент проактивної підтримки на основі «GPT-4» [21].

Незалежно від класифікації – аналітика даних, машинне навчання або штучний інтелект, рішення Республіки Ірландія інвестувати ресурси в розвиток університетського сектора є обґрунтованим. У зв'язку з цим слід зазначити, що майже 25 років тому уряд Республіки Ірландія ухвалив рішення використовувати академічний підхід до розвитку талантів у галузі штучного інтелекту. Це рішення принесло свої плоди, оскільки доступ до талановитих фахівців став ключовим чинником, що привертає компанії до інвестування в дослідження і розробки в галузі штучного інтелекту в Республіці Ірландія. В країні існує безліч дослідників у галузі штучного інтелекту, які домоглися успіху і займають високі посади в міжнародних компаніях [7].

Нині увага до університетського сектору залишається актуальною. Так, наприклад, у 2024 р. Лімерикський університет (англ. the University of Limerick, UL) домігся значного успіху, призначивши відомого вченого – Л. Бріана, на посаду професора програмної інженерії на факультеті комп'ютерних наук та інформаційних систем. Л. Бріан також є директором компанії «Lero», дослідницького центру програмного забезпечення «Наукового фонду Ірландії». Професор Л. Бріан має 30-річний досвід роботи в галузі надійного програмного забезпечення та досліджень у галузі штучного інтелекту [19].

Загалом, можна констатувати, що Республіка Ірландія позиціонує себе як центр ЄС з етики та безпеки штучного інтелекту, аналогічно до того, як вона стала центром управління даними в ЄС відповідно до «Загального положення про захист даних» ЄС. Протягом тривалого часу ірландські компанії активно використовують штучний інтелект у своїй діяльності. В Республіці Ірландія сформувалося ефективне міждисциплінарне дослідницьке середовище, що активно взаємодіє з компаніями за такими актуальними напрямками, як інтерпретований штучний інтелект (фокусується на створенні від самого початку зрозумілих моделей, які можна легко інтерпретувати), управління даними та штучний інтелект, безпечний штучний інтелект та етичні аспекти використання штучного інтелекту [7].

Впровадження освітніх програм у сфері штучного інтелекту є актуальним у світлі нещодавнього ухвалення «Закону ЄС про штучний інтелект», який являє собою перший у світі нормативно-правовий акт у цій сфері. Набуття законом чинності може надати Республіці Ірландія можливість зайняти нішу у сфері етики та безпеки штучного інтелекту. Закон спрямований на створення загальної нормативно-правової бази для використання штучного інтелекту. Його ухвалив Європейський парламент 13 березня 2024 р. і схвалила Рада ЄС 21 травня 2024 р. Сфера дії закону охоплює всі галузі (крім військової) і всі види штучного інтелекту. Закон не наділяє правами окремих осіб, але регулює діяльність постачальників систем штучного інтелекту та організацій, що використовують їх у професійній діяльності [31].

«Закон ЄС про штучний інтелект» також пропонує створити Європейську раду зі штучного інтелекту, яка сприятиме національній співпраці та забезпечуватиме дотримання правил. Закон класифікує додатки, що використовують штучний інтелект, залежно від ступеня ризику заподіяння шкоди користувачеві. Продукти ШІ можна розділити на три категорії: 1. *Заборонені системи*. Такі системи мають неприпустимий ступінь ризику; 2. *Системи з високим ступенем ризику*. Ці системи становлять значну загрозу здоров'ю, безпеці або основним правам людини. Вони вимагають обов'язкової оцінки відповідності, що проводиться постачальником, перед випуском на ринок; 3. *Решта систем штучного інтелекту* [31].

У різних галузях промисловості та в суспільстві загалом програмні системи дедалі частіше використовують технології ШІ. Незважаючи на значні потенційні переваги, впровадження ШІ також

асоціюється з низкою проблем, пов'язаних із забезпеченням безпеки, захисту, неупередженості та справедливості систем, а також іншими аспектами, що впливають на рівень довіри до них. Наприклад, системи не повинні дискримінувати групи людей, не повинні розкривати особисту інформацію і завжди повинні відповідати базовим вимогам безпеки. Забезпечення надійності систем на основі ШІ має вирішальне значення для запобігання потенційній шкоді від їхнього використання і спрямоване на можливість використання переваг впровадження таких систем. Проблеми, пов'язані з надійністю, характерні не тільки для ШІ, а й для програмного забезпечення загалом. Однак сама природа ШІ, його складність і невизначеність означають, що чим більше люди покладаються на нього, тим більшою виникає потреба в довірі до цих систем. У зв'язку з цим світ стрімко рухається до створення дедалі потужніших генеративних систем ШІ та великих мовних моделей. У цьому контексті Республіка Ірландія може відіграти важливу роль у використанні цих технологій на благо всіх [19].

Таким чином, штучний інтелект являє собою основоположну технологію, яка здатна зробити революцію в різних галузях, таких як охорона здоров'я, освіта, транспорт і виробництво. Хоча перетворювальний потенціал ШІ незаперечний, він також вплетений у складну систему соціальних, етичних та емоційних аспектів. У контексті розвитку ШІ важливо враховувати суспільні настрої, які відіграють ключову роль у формуванні політики і стратегій у цій галузі. Діалектика надій і побоювань, пов'язаних зі ШІ, істотно впливає на технологічну траєкторію та інтеграцію ШІ в суспільство. Республіка Ірландія швидко стає центром технологічних інновацій у Європі завдяки сприятливій державній політиці та зростаючій присутності глобальних технологічних компаній. У цьому контексті ШІ виходить за рамки теоретичних дискусій і стає важливим елементом суспільної уваги [22].

Штучний інтелект має значний вплив на спосіб життя і роботу людей. Залежно від того, як використовуються технології ШІ і для яких цілей, вони можуть сприяти прогресу і приносити користь усьому суспільству. Однак впровадження ШІ також викликає етичні проблеми і може призвести до негативних наслідків. При впровадженні в трудову сферу перетворювальний потенціал ШІ стикається з низкою складних національних і європейських правил. До впровадження штучного інтелекту в Республіці Ірландія не існувало трудового законодавства, яке могло б слугувати основою для розроблення чітких орієнтирів. Як і у випадку з будь-якими іншими новими технологіями, виникає суперечність між двома підходами до регулювання: суворим регулюванням, спрямованим на захист суспільства від потенційних небезпек, і мінімальним регулюванням, що сприяє впровадженню технологій та інновацій. Для роботодавців, які інвестують у системи ШІ, основною мотивацією є поліпшення організації робочого процесу, підвищення продуктивності та конкурентоспроможності. Співробітники, навпаки, можуть побоюватися звільнення і хочуть мати можливість впливати на те, як штучний інтелект і алгоритми будуть інтегровані в їхню повсякденну діяльність [27].

Висновки. Республіка Ірландія є державою з багатою історією технологічних інновацій. Останніми роками ірландський уряд активно інвестує в розвиток штучного інтелекту, що сприяє активному розвитку технологічного сектора країни. Особлива увага приділяється досягненням у галузі штучного інтелекту. Державні органи, освітні установи, а також компанії та підприємства активно впроваджують технології штучного інтелекту. У 2021 р. уряд Республіки Ірландія представив нову «Національну стратегію в галузі штучного інтелекту», яка містить план з інвестування значних фінансових ресурсів у розвиток технологій штучного інтелекту. Стратегія розвитку штучного інтелекту в Республіці Ірландія може стати прикладом для інших країн.

В Республіці Ірландія активно працюють такі компанії, як «Google», «Facebook», «Microsoft» і «Amazon». Це створює сприятливе середовище для стартапів і підприємців, які працюють у галузі штучного інтелекту та інших технологій. Крім того, ірландські фахівці мають високий рівень освіти і володіють англійською мовою, що полегшує взаємодію з компаніями по всьому світу. Загалом, Республіка Ірландія є привабливим місцем для компаній, зацікавлених в інвестуванні в штучний інтелект.

Штучний інтелект стрімко розвивається, і ця технологія може істотно вплинути на життя і роботу ірландців. Впровадження ШІ в різні сфери життя людини може принести низку переваг. Однак розвиток цієї технології також пов'язаний із певними ризиками. Останніми роками в різних країнах, включно з Республікою Ірландія, докладають зусиль для вирішення проблем, пов'язаних зі штучним інтелектом, за допомогою політичних ініціатив і регулювання. Республіка Ірландія активно працює над створенням системи штучного інтелекту, яка буде справедливою і чесною. У країні успішно вирішуються складні етичні питання, і встановлюються суворі правила. Республіка Ірландія не тільки говорить про свої наміри, а й робить конкретні дії для дотримання вимог у сфері штучного інтелекту. Наразі майбутнє розвитку штучного інтелекту в Республіці Ірландія виглядає більш перспективним і етичним, ніж будь-коли раніше. Етичні принципи ШІ в Республіці Ірландія включають прозорість, справедливість, недискримінацію, конфіденційність і безпеку.

Нормативна база Республіки Ірландія спрямована на досягнення балансу між інноваціями та додержанням етичних норм, при цьому «Закон про захист даних» 2018 р. (англ. Data Protection Law) та «Загальні положення про захист даних» (англ. General Data Protection Regulation, GDPR) застосовуються до додатків, програм та систем зі штучним інтелектом, що використовують персональні дані. Важливим аспектом є те, що в ЄС відбулися значні зміни в регулюванні штучного інтелекту у вигляді ухвалення «Закону Європейського союзу про штучний інтелект» 2024 р. Точний вплив цього закону на Республіку Ірландія ще належить визначити. Однак, як обов'язковий до виконання нормативний акт, «Закон Європейського союзу про штучний інтелект» матиме значні наслідки для Республіки Ірландія, оскільки він визначить підхід ірландської держави до штучного інтелекту в майбутньому.

Стратегії забезпечення відповідності вимогам штучного інтелекту в Республіці Ірландія має ґрунтуватися на кількох ключових принципах. По-перше, необхідно створити надійну нормативно-правову базу, що регулюватиме використання штучного інтелекту і забезпечить захист прав та інтересів громадян. По-друге, важливо формувати культуру відповідальності у користувачів і розробників штучного інтелекту, щоб вони усвідомлювали свою відповідальність за наслідки своїх дій. По-третє, необхідно проводити попереджувальний аналіз потенційних ризиків, пов'язаних із використанням штучного інтелекту, щоб запобігти можливим негативним наслідкам. По-четверте, необхідно розвивати співпрацю між усіма зацікавленими сторонами, включно з державними органами, бізнесом і громадськістю, для спільної роботи над створенням безпечної та ефективної системи регулювання штучного інтелекту. І нарешті, необхідно постійно адаптуватися до технологічних досягнень у галузі штучного інтелекту, щоб бути готовими до нових викликів і можливостей, які надає ця технологія.

Список використаних джерел:

1. A definition of Artificial Intelligence: main capabilities and scientific disciplines. *An official website of the European Union*. December 18, 2018. URL: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/definition-artificial-intelligence-main-capabilities-and-scientific-disciplines>
2. AI – Here for Good A National Artificial Intelligence Strategy for Ireland. *Government of Ireland*. 2021. URL: <https://enterprise.gov.ie/en/publications/publication-files/national-ai-strategy.pdf>
3. Artificial Intelligence: Friend or Foe. Summary and Public Policy Considerations. *Department of Finance and Department of Enterprise, Trade and Employment of Ireland*. June 11, 2024. URL: <https://www.gov.ie/en/publication/6538e-artificial-intelligence-friend-or-foe/>
4. Artificial Intelligence (AI) Research in Ireland. *Scientific Fund of Ireland*. 2019. URL: <https://www.sfi.ie/research-news/stories/ai/>
5. Artificial Intelligence – Ireland. *Statista*. March 2024. URL: <https://www.statista.com/outlook/tmo/artificial-intelligence/ireland#analyst-opinion>
6. Artificial Intelligence for Europe. *European Commission*. April 25, 2018. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2018%3A237%3AFIN>
7. Cost of Studying Masters in Artificial Intelligence in Ireland for International Students. *Abroad Education Consultants*. November 9, 2023. URL: <https://www.aecoverseas.com/blog/study-artificial-intelligence-in-ireland/>
8. Data Protection Act (DPA) Ireland 2018. *IT-governance*. 2018. URL: <https://www.itgovernance.eu/en-ie/data-protection-ie>
9. Data Protection Commission of Ireland. 2025. URL: <https://www.dataprotection.ie/en>
10. Digital economy and society statistics – enterprises. *An official website of the European Union*. February 11, 2025. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Digital_economy_and_society_statistics_-_enterprises#Artificial_intelligence_28AI.29
11. Establishing Ethical AI: Ireland's Approach to AI Standards and Compliance. *iLead Virtual Learning Centre*. 2025. URL: <https://ilead.ie/establishing-ethical-ai-irelands-approach-to-ai-standards-and-compliance/>
12. Ethics guidelines for trustworthy AI. *An official website of the European Union*. April 8, 2019. URL: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/ethics-guidelines-trustworthy-ai>
13. Future of Work Report. *LinkedIn*. November 2023. URL: <https://economicgraph.linkedin.com/content/dam/me/economicgraph/en-us/PDF/future-of-work-report-ai-november-2023.pdf>
14. General data protection regulation. *Access to European Union law*. 2018. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=LEGISSUM:310401_2&from=EN
15. Generative AI in Ireland 2024 – Trends and Insights. *Microsoft*. 2024. URL: <https://pulse.microsoft.com/en-ie/work-productivity-en-ie/na/fa1-generative-ai-adoption-rates-are-on-the-rise-in-workplaces-according-to-our-latest-report-supported-by-trinity-college-dublin/>
16. ICT Usage by Enterprises. *Central Statistics Office of Ireland*. 2024. URL: <https://www.cso.ie/en/statistics/information-society/ictusagebyenterprises/>
17. 2024 is expected to see a marked uplift towards AI and GenAI adoption – but many wary of its ability to build trust. *PwC Ireland*. June 25, 2024. URL: <https://www.pwc.ie/media-centre/press-releases/2024/gen-ai-business-leaders-survey-2023.html>
18. Ireland Artificial Intelligence. *International Trade Administration*. July 6, 2020. URL: <https://www.trade.gov/market-intelligence/ireland-artificial-intelligence>

19. Ireland's Artificial Intelligence hub. *IDA Ireland*. 2025. URL: <https://www.idaireland.fr/latest-news/insights/augmenting-ireland>
20. Ireland – Law Over Borders Comparative Guides of Artificial Intelligence. *The Global Post*. Jctober 2022. URL: <https://www.globallegalpost.com/lawoverborders/artificial-intelligence-1272919708/ireland-636671881>
21. Irish-founded tech firm Intercom reaches 'unicorn status' with its \$1bn-plus valuation. *The Journal*. March 27, 2018. URL: <https://www.thejournal.ie/intercom-funding-3-3927510-Mar2018/>
22. Irfan M., Murray L., Aldulaylan F., Alqahtani Y., Latif F. Sentiments and Discourses: How Ireland Perceives Artificial Intelligence. *Remittances Review*. June, 2023. Vol. 8(4). P. 3625–3642. URL: <https://doi.org/10.33182/rr.v8i4.250>
23. Lynch M. Artificial Intelligence. Background and overview of the current regulatory landscape in Ireland and the EU. *Sportlight*. October 9, 2024 (No4). URL: https://data.oireachtas.ie/ie/oireachtas/libraryResearch/2024/2024-10-10_spotlight-artificial-intelligence-background-and-overview-of-the-current-regulatory-landscape-in-ireland-and-the-eu_en.pdf
24. McIntyre T. Regulating the Information Society: Data Protection and Ireland's Internet Industry / in Farrell and Hardiman (eds), *The Oxford Handbook of Irish Politics*. Oxford University Press, 2020. URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3590302
25. Mindell D., Autor D., Reynjlds E. Task Force on the Work of the Future. MIT work of the future. November 17, 2020. URL: <https://workofthefuture-taskforce.mit.edu/>
26. Newenham P. Silicon Docks: The Rise of Dublin as a Global Tech Hub. Dublin: Liberties Press, 2015.
27. Pape M. Addressing AI risks in the workplace. *European Parliamentary Research Service of European Parliament*. June 2024. URL: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2024/762323/EPRS_BRI\(2024\)762323_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2024/762323/EPRS_BRI(2024)762323_EN.pdf)
28. Recommendation of the Council on Artificial Intelligence. *OECD*. May 3, 2024. URL: <https://legalinstruments.oecd.org/en/instruments/OECD-LEGAL-0449>
29. Research Ireland. *Science Foundation of Ireland*. 2017. URL: <https://www.sfi.ie/>
30. SFI Centre for Research Training in Artificial Intelligence. *Scientific Fund of Ireland*. 2024. URL: <https://www.sfi.ie/funding/centres-research-training/artificial-intelligence/>
31. The EU Artificial Intelligence Act. *official online database of European Union law and other public documents – Euro-Lex*. March 18, 2024. URL: <https://artificialintelligenceact.eu/>
32. Zúñiga G., Goyanes M., Durotoye T. A Scholarly Definition of Artificial Intelligence (AI): Advancing AI as a Conceptual Framework in Communication Research. *Political Communication*. 2023. Vol. 41(2). P. 317–334. URL: <https://doi.org/10.1080/10584609.2023.2290497>

УДК 631.153:004.89:631.95

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.17>

Олена МАРЧЕНКО

старший викладач кафедри інформатики та програмної інженерії,
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", marchenko.helene@gmail.com
ORCID: 0000-0001-5754-4920

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ БЕЗПІЛОТНИМИ ПЛАТФОРМАМИ ДЛЯ ЗБОРУ АГРАРНИХ ДАНИХ: АРХІТЕКТУРА, ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Анотація. Стаття присвячена дослідженню архітектурних засад і програмно-апаратних засобів автоматизованих систем управління безпілотними платформами для збору, обробки та аналізу даних у сільському господарстві. Особлива увага приділяється застосуванню БПЛА для точного землеробства, що забезпечує моніторинг агроландшафтів і оптимізацію аграрних процесів.

Мета дослідження. Метою роботи є аналіз і оцінка архітектурних рішень та програмно-апаратного забезпечення для ефективного функціонування автоматизованих систем управління БПЛА, спрямованих на моніторинг і аналіз агротехнологічних параметрів у сільському господарстві.

Матеріали і методи. У дослідженні використано БПЛА, оснащені RGB-камерами, мультиспектральними та інфрачервоними сенсорами, тепловізорами, лазерними сканерами та радарними системами. Застосовано методи фотограмметрії, аналізу вегетаційних індексів (NDVI, GNDVI, ExG, ExGR), згорткових нейронних мереж (CNN) і глибокого навчання для обробки зображень. Навчальні вибірки формувалися з використанням генераторів даних, а обробка здійснювалася за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, інтегрованого з ГІС і хмарними обчисленнями. Отримані наукові результати. Розроблено прототип автоматизованої системи на основі БПЛА, здатної виявляти фітопатологічні зміни, оцінювати стан ґрунтів і рослинності з точністю просторового розширення 1–10 см. Реалізовано модель нейронної мережі (InceptionV2), яка забезпечує класифікацію зображень із високою точністю, зокрема для діагностики хвороб рослин. Використання вегетаційних індексів і теплових карт дозволило створювати картографи стану посівів і прогнозувати врожайність. Система продемонструвала ефективність у моніторингу вологості ґрунту, стресу рослин і текстури ґрунту, сприяючи прийняттю обґрунтованих агротехнологічних рішень.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження передбачають удосконалення сенсорних систем, впровадження автономних роїв БПЛА, інтеграцію з IoT і розробку алгоритмів штучного інтелекту для прогнозування аграрних параметрів. Планується масштабування рішень для великих сільськогосподарських площ і підвищення економічної ефективності шляхом оптимізації витрат на моніторинг і управління.

Ключові слова: автоматизовані системи управління, безпілотні літальні апарати, нейронні мережі, штучний інтелект, інтелектуальні системи моніторингу.

Olena MARCHENKO. AUTOMATED CONTROL SYSTEMS FOR UNMANNED PLATFORMS FOR AGRICULTURAL DATA COLLECTION: ARCHITECTURE, SOFTWARE, DEVELOPMENT PROSPECTS

Abstract. The article is devoted to the study of the architectural principles and software and hardware of automated control systems for unmanned platforms for collecting, processing and analyzing data in agriculture. Particular attention is paid to the use of UAVs for precision agriculture, which provides monitoring of agricultural landscapes and optimization of agricultural processes.

Purpose of the study. The purpose of the work is to analyze and evaluate architectural solutions and software and hardware for the effective functioning of automated UAV control systems aimed at monitoring and analyzing agro-technological parameters in agriculture.

Materials and methods. The study used UAVs equipped with RGB cameras, multispectral and infrared sensors, thermal imagers, laser scanners and radar systems. The methods of photogrammetry, analysis of vegetation indices (NDVI, GNDVI, ExG, ExGR), convolutional neural networks (CNN) and deep learning for image processing were applied. Training samples were formed using data generators, and processing was carried out using specialized software integrated with GIS and cloud computing. Scientific results obtained. A prototype of an automated system based on UAVs was developed, capable of detecting phytopathological changes, assessing the state of soils and vegetation with an accuracy of spatial extension of 1–10 cm. A neural network model (InceptionV2) was implemented, which provides high-precision image classification, in particular for diagnosing plant diseases. The use of vegetation indices and heat maps made it possible to create cartograms of crop conditions and predict yield. The system demonstrated effectiveness in monitoring soil moisture, plant stress, and soil texture, contributing to the adoption of informed agrotechnological decisions.

Prospects for further research. Further research involves improving sensor systems, implementing autonomous UAV swarms, integrating with IoT, and developing artificial intelligence algorithms for predicting agricultural parameters. It is planned to scale solutions for large agricultural areas and increase economic efficiency by optimizing monitoring and management costs.

Key words: automated control systems, unmanned aerial vehicles, neural networks, artificial intelligence, intelligent monitoring systems.

Постановка проблеми. Актуальність дослідження зумовлена зростаючими потребами аграрного сектору у впровадженні високоточних технологій для підвищення ефективності виробничих процесів, оптимізації використання ресурсів та забезпечення стійкого розвитку сільського господарства. Застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) як ключового елементу у системах точного землеробства дозволяє не лише оперативно отримувати візуальні дані про стан посівів, структуру ґрунтів, наявність бур'янів чи шкідників, але й автоматизувати процеси моніторингу та аналітики, що раніше вимагали значних людських ресурсів і часу. Саме БПЛА, здатні діяти в автономному режимі, створюють передумови для побудови комплексних автоматизованих систем управління, які використовують сучасні програмні модулі для обробки зображень, метеоданих, агрохімічної інформації, що в сукупності формують потужні інструменти підтримки аграрних рішень.

Попри значний науково-технічний прогрес, сфера автоматизованого управління безпілотними агроплатформами ще потребує вдосконалення з погляду архітектурних рішень, адаптивності програмного забезпечення до змінних польових умов, зменшення вартості обладнання та забезпечення його надійності за різних погодних умов.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах Воронько В., Воронько І. [3], Яровий О. [12], Макам С., Коматінені Б. К., Міна С. С. [13], підкреслюється значний потенціал використання безпілотних платформ для детального аналізу просторової неоднорідності агроєкосистем, урахування ґрунтово-кліматичних і агрометеорологічних умов, а також для дистанційного визначення ключових вегетаційних індексів на основі даних, отриманих у різних спектральних діапазонах. Особливу увагу у науковому дискурсі приділено питанням оперативної обробки інформації, що надходить із відеокамер, спектральних та радіометричних сенсорів, встановлених на мобільних платформах. У цьому контексті актуальними є дослідження у сфері побудови ефективної архітектури штучних нейронних мереж (ШНМ), які можуть бути адаптовані до специфіки аграрного моніторингу. Праці таких науковців, як Македон В., Байлова О. [6], Папуша Д., Оболонков Д. [8], висвітлюють широкі можливості застосування нейромережових структур для автоматизованого розпізнавання об'єктів, класифікації стану культур і прогнозування змін у польових умовах. Окремим напрямом досліджень є застосування геостатистичних методів, які дозволяють здійснювати просторовий аналіз великих масивів даних і порівнювати продуктивність різних ділянок поля між собою, базуючись на варіаціях урожайності розкриті в роботах Бурлака С., Далека А. [2], Омер А. А., Акбарі Д. [15]. Такі підходи дають змогу виявляти чутливість культур до певних біофізичних чинників, визначати локальні зони ризику, а також формувати рекомендації щодо агротехнологічних заходів.

Метою статті – дослідити та дати оцінку архітектурним засадам та програмно-апаратним засобам ефективної роботи автоматизованих систем управління безпілотними платформами, призначених для збору, обробки та аналізу даних у сільському господарстві.

Виклад основного матеріалу. У сучасних умовах точне землеробство виступає інноваційною моделлю ведення господарства, що ґрунтується на індивідуалізованому підході до обробітку ґрунту, внесення добрив та зрошення відповідно до особливостей ґрунтового покриття, рівня вологості, мікроклімату й інших факторів, що впливають на продуктивність агроландшафтів. Завдяки здатності БПЛА здійснювати знімання у видимому, інфрачервоному та мультиспектральному діапазонах, сучасне аграрне підприємство отримує можливість не лише виявляти осередки стресу у рослин, але й прогнозувати врожайність, оптимізувати стратегії обробітку та зонального управління полями (рис. 1).

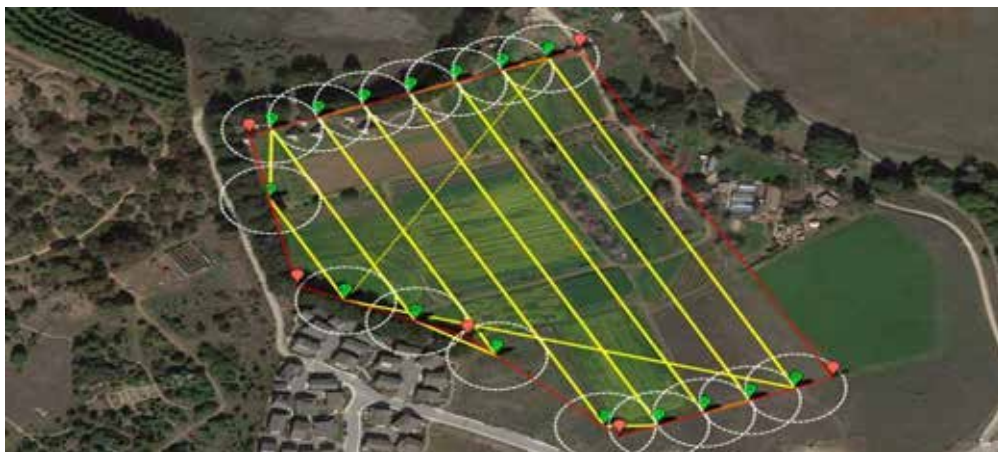


Рис. 1. Побудова маршруту обльоту аграрного поля безпілотним літальним апаратом з урахуванням зон перекриття та точок збору геопросторових даних [17]

У контексті розробки автоматизованих систем управління такими платформами особливу роль відіграють засоби збору зображень, їх просторової прив'язки та подальшої комп'ютерної обробки, що є критично важливими для ефективного моніторингу аграрних площ. Центральною складовою сенсорного комплексу БПЛА є цифрові камери різного спектрального діапазону, серед яких використовуються як стандартні RGB-камери (спектр 0,35–0,7 мкм), так і пристрої для знімання в ближньому та середньому інфрачервоному діапазонах (0,7–5 мкм), тепловізори (8–14 мкм), лазерні сканери, а також радарні системи. Застосування цих пристроїв у сільськогосподарській практиці потребує побудови ортофотопланів, обробки зображень з урахуванням агротехнологічних чинників та проведення багаторівневого аналізу, що в сукупності є складовою інтелектуального управління польовими роботами [4].

Високоточне зображення з просторовим розширенням від 1 до 10 см (залежно від висоти польоту) дає змогу здійснювати якісний аналіз структури ґрунту, виявляти стадії розвитку культур, ідентифікувати стресові зони та прогнозувати врожайність на основі історичних метеорологічних даних. Ключовим технологічним принципом є реєстрація відбиття сонячного світла від земної поверхні у визначених діапазонах спектра, що забезпечує надзвичайно точну оцінку біофізичних характеристик сільськогосподарських угідь. Так, RGB-камери фіксують три основні канали (синій – 0,35–0,45 мкм, зелений – 0,45–0,55 мкм, червоний – 0,55–0,65 мкм), тоді як мультиспектральні системи включають додаткові канали червоного краю (0,65–0,75 мкм) та ближнього інфрачервоного спектра (0,75–0,85 мкм), що розширює аналітичні можливості автоматизованої обробки зображень (рис. 2) [2].

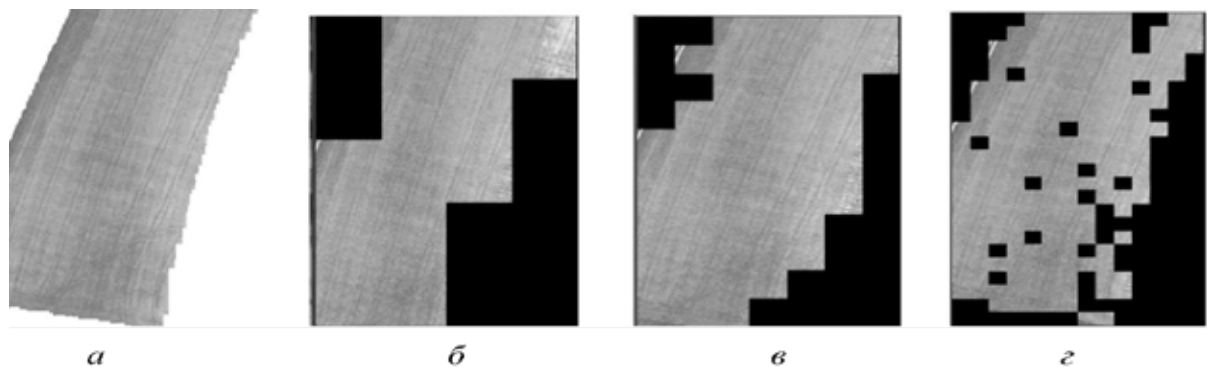


Рис. 2. Кластеризація аграрного поля за різного розміру блоків: а – вихідне зображення; б – реконструйоване зображення для блоків 100×100 пікселів; в – для блоків 50×50 пікселів; г – для блоків 25×25 пікселів

Джерело: побудовано автором

Одним із базових параметрів, що використовується для оцінювання стану рослин, є вегетаційні індекси, які можуть розраховуватись як на основі мультиспектральної інформації, так і виключно за каналами RGB. Найпоширенішим індексом є NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), який визначається за формулою:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}, \quad (1)$$

та варіюється в межах від -1 до +1. Значення індексу NDVI дозволяють оцінити густоту та стан рослинності: відсутність – значення близьке до нуля, середня щільність – у межах 0,2–0,5, висока щільність – понад 0,7.

Інші вегетаційні індекси, такі як GNDVI (який використовує зелений канал замість червоного), а також простіші RGB-індекси на кшталт Greenness, ExG, ExGR, також широко застосовуються у практиці для визначення фотосинтетичної активності, виявлення бур'янів або посушливих зон.

$$Greenness = (Green) / (Red + Green + Blue), \quad (2)$$

$$ExG1 = \frac{(2 \times Green - Red - Blue)}{(2 \times Red + Green + Blue)}, \quad (3)$$

або:

$$ExGR2 = \frac{(2 \times Green - 2 \times Red + Blue)}{(2 \times Red + 2 \times Green + Blue)} \quad (4)$$

Застосування вегетаційних індексів у поєднанні з автоматизованими аналітичними системами на основі БПЛА дозволяє будувати математичні моделі, які враховують метеорологічні умови, фазу розвитку рослин і специфіку земельних ділянок (рис. 3).

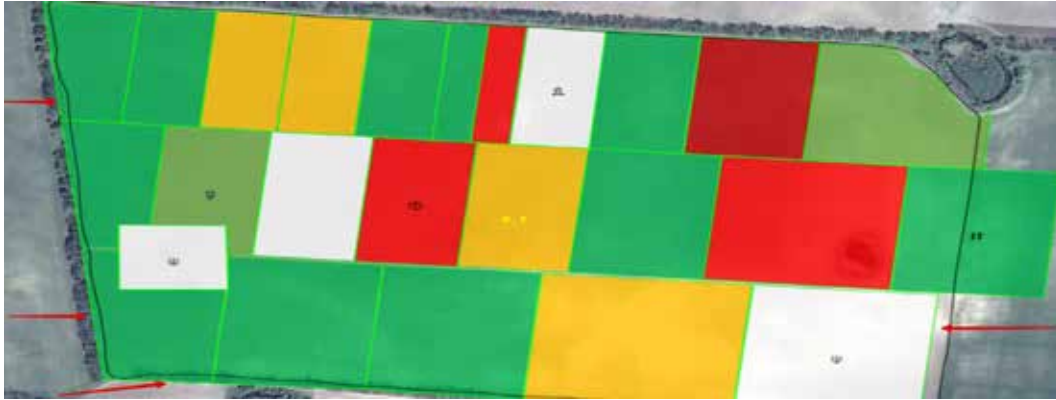


Рис. 3. Картограма стану посівів за результатами обробки мультиспектральних знімків з БПЛА з класифікацією ділянок за індексами вегетації [11]

Визначений підхід забезпечує високий ступінь обґрунтованості аграрних рішень, сприяє мінімізації втрат врожаю та дає змогу переходити до концепції управління на основі даних (data-driven agriculture). У таблиці 1 наведено основні сфери застосування зображень БПЛА у сільськогосподарській практиці і збиранні цифрових даних.

Таблиця 1

Результати збору аграрних даних за допомогою автоматизованих систем управління безпілотними платформами (побудовано автором)

Параметр	Результат	Часовий інтервал	Область застосування
Вологість ґрунту	Карта просторового розподілу вологості ґрунту, отримана з даних сенсорів безпілотних платформ	Оперативний моніторинг	Локальна та регіональна
Стрес рослин	Просторово-часова варіабельність температури та вологості, отримана через аналіз мультиспектральних зображень	Оперативний моніторинг	Локальна та регіональна
Випаровуваність	Індикатор швидкості зміни вологості ґрунту на основі даних тепловізійного сканування	Періодичний аналіз	Регіональна
Хвороби рослин	Просторово-часова варіабельність вегетаційного індексу (NDVI), визначена за допомогою автоматизованого аналізу зображень	Оперативний та періодичний	Локальна та регіональна
Текстура ґрунту	Карти кореляції між складом ґрунту та температурою поверхні, створені на основі інтеграції даних сенсорів та програмного аналізу	Періодичний аналіз	Регіональна

Одним із найперспективніших напрямів у галузі цифрової трансформації аграрного сектору, який забезпечує можливість автоматизованого моніторингу стану сільськогосподарських об'єктів, є застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА), оснащених сучасними відеокамерами, мультиспектральними або інфрачервоними сенсорами, у поєднанні з технологіями комп'ютерного зору та алгоритмами штучних нейронних мереж [1]. Такий підхід дозволяє реалізовувати комплексну діагностику агроценозів у реальному часі з високим рівнем автоматизації, що, у свою чергу, мінімізує потребу у традиційному, фрагментарному зборі даних та підвищує загальну ефективність прийняття агротехнологічних рішень.

Застосування нейромережевих технологій, зокрема в області глибокого навчання, створює можливість автоматизованого виявлення фітопатологічних змін рослин, визначення біофізичних характеристик посівів, таких як щільність, структура листя, рівень стресу, за допомогою розрахунку вегетаційних

індексів (NDVI, EVI, GNDVI, CVI, Truecolor тощо), що забезпечує комплексний і високоточний підхід до агромоніторингу. БПЛА, що працюють у зв'язці з відповідним програмним забезпеченням та серверною обчислювальною інфраструктурою, здатні здійснювати знімання територій площею понад 10 гектарів, що дозволяє масштабувати рішення без втрати якості [10].

Однією з найбільш складних і актуальних задач у процесі автоматизованого пошуку та відбору релевантної інформації для оцінювання й прогнозування рівня продуктивності сільськогосподарських культур є забезпечення точної автоматизованої ідентифікації кількісних і якісних показників, що безпосередньо належать до цільової предметної області, зокрема через розрахунок вегетаційних індексів, таких як NDVI. У цьому контексті постає необхідність вирішення задачі багатокласової класифікації візуальних даних, в основі якої лежить аналіз графічної інформації, що надходить із БПЛА.

З метою виявлення неоднорідностей у розвитку посівів, які можуть критично впливати на майбутню врожайність, була розроблена штучна нейронна мережа (ШНМ), оптимізована для обробки зображень, отриманих з квадрокоптерів. Для побудови навчальної, валідаційної та тестової вибірок використовувалися кольорові фотознімки ділянок посівів з ознаками як рівномірного розвитку, так і з характерними дефектами, зумовленими хворобами, агротехнічними порушеннями або стресовими факторами середовища (рис. 4).



Рис. 4. Типові зображення, використані для навчання штучної нейронної мережі [16]

Задача класифікації зображень, що використовуються для моніторингу стану сільськогосподарських посівів, була реалізована в рамках наступного формалізованого підходу: для кожного кольорового зображення, отриманого з відеокамери, закріпленої на борту БПЛА, система штучної нейронної мережі (ШНМ) мала визначити, до якого із двох класів належить відповідна ділянка поля до зони з рівномірним розвитком рослинності, або ж до зони, що має візуально зафіксовані дефекти (нерівномірний посів, засміченість, ураження хворобами чи шкідниками тощо) [9].

Оскільки початковий обсяг емпіричних даних для навчання ШНМ був обмеженим, у процесі підготовки вибірки активно використовувалися генератори даних, що дозволяли штучно створювати достатню кількість зображень із варіативними параметрами, формуючи повноцінні навчальні датасети. Це дало змогу підвищити узагальнюючу здатність мережі до нових вхідних зображень.

Результати навчання розробленої моделі ШНМ, орієнтованої на автоматичне розпізнавання стану посівів, представлені на рис. 5. Варіативність результатів, зокрема різниця між варіантами а) і б), пояснюється стохастичним характером ініціалізації вагових коефіцієнтів нейронів, а також використанням різних комбінацій навчальних і валідаційних вибірок [18]. Це є типовим явищем для задач, пов'язаних із глибоким навчанням, що потребують ретельного підбору гіперпараметрів, визначення архітектури мережі, а в деяких випадках і побудови ансамблів ШНМ для досягнення стабільних результатів.

Водночас як показує аналіз, класичні архітектури, зокрема прості повнозв'язні або рекурентні мережі, навіть при значному обсязі навчальної вибірки, не демонструють задовільної точності у складних класифікаційних задачах, пов'язаних з агровізуальними даними, що і обумовлює доцільність використання більш складних згорткових нейронних

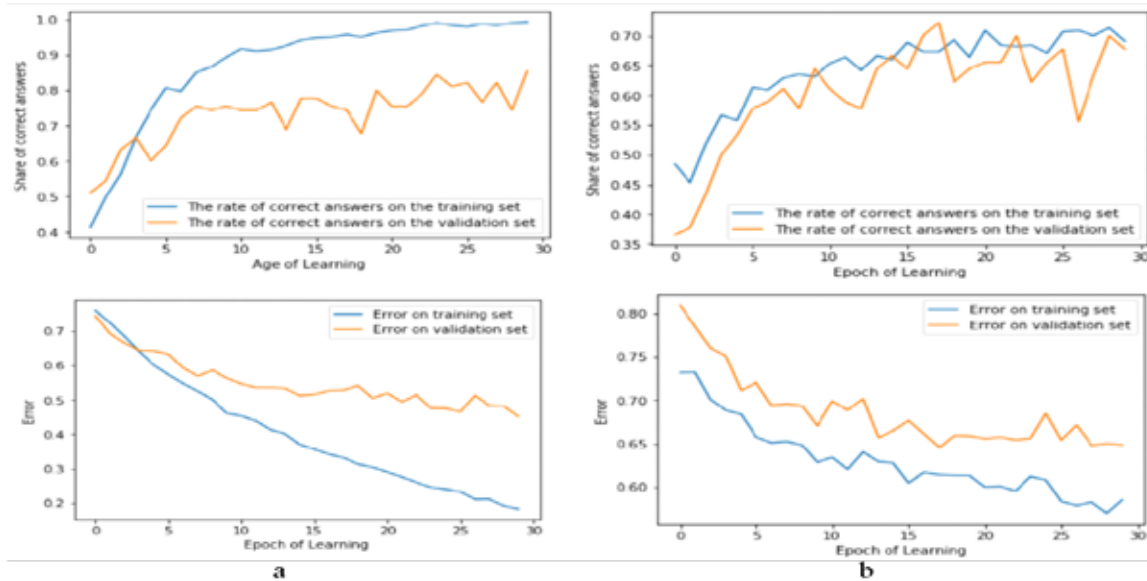


Рис. 5. Приклади діаграм навчання розробленої штучної нейронної мережі для виявлення неоднорідностей у структурі посівів

Джерело: побудовано автором

В межах дослідження ми можемо запропонувати автоматизований технологічний комплекс, що включає БПЛА коптерного типу та серверну частину, інтегровану з алгоритмами машинного зору. Цей комплекс був спрямований на виявлення ознак захворювань сільськогосподарських культур шляхом аналізу фотозображень листя, отриманих з бортової камери дрона. Ключовим етапом створення системи стала побудова архітектури нейронної мережі, адаптованої до завдань класифікації та детектування патологічних змін у рослинних структурах на основі візуальних даних [14].

Для ефективного виявлення об'єктів на зображеннях було обрано методи глибокого навчання на основі згорткових нейронних мереж (CNN), що продемонстрували вищу точність порівняно з класичними підходами до обробки зображень. У процесі дослідження було протестовано низку відомих моделей, зокрема SqueezeNet, ResNet, ImageNet, Inception, DenseNet, AlexNet та YOLO. Результати експериментального тестування засвідчили, що модель InceptionV2 є найбільш збалансованим рішенням у контексті точності розпізнавання, швидкодії та помірного споживання обчислювальних ресурсів.

Процес навчання нейронної мережі передбачав використання навчальної вибірки, що включала близько 2500 зображень з ознаками ураження. Анування зображень здійснювалося за допомогою інструменту Labellmg, що дозволило сформувати якісно розмічену базу для подальшої валідації та тренування нейромережевої моделі. На основі отриманих результатів було реалізовано прототип системи, здатної у реальному часі виявляти хвороби культур і транслювати відповідні сигнали в аграрну систему прийняття рішень [5]. У процесі реалізації автоматизованого виявлення захворювань рослин відеодані, отримані з безпілотної платформи, проходять обов'язкову процедуру попередньої обробки, яка включає покадрову сегментацію (раскадровку) та нормалізацію зображень для уніфікації формату та параметрів вхідної інформації. Це забезпечує високу якість вхідних даних для подальшої обробки за допомогою алгоритмів машинного зору (рис. 6.).

Інтерактивна теплова карта, сформована на основі результатів нейросетевого аналізу, за кольоровою шкалою відображає наявність фітопатологічних ознак на певних ділянках досліджуваної території, що дає змогу оперативно та адресно направляти фахівців для проведення додаткових обстежень і встановлення характеру виявлених захворювань.

Зокрема, червоний маркер на мапі вказує на зону, де нейронна мережа зафіксувала перевищення порогу уражених листків понад 10%, а сукупність таких маркерів формує червоне хмароподібне скупчення – візуальний осередок ймовірного ураження. Водночас теплова карта надає можливість фіксувати динаміку розвитку захворювання у просторі та часі, що значно підвищує ефективність моніторингових процедур та обґрунтованість прийнятих агротехнологічних рішень.

Результати детектування, що формуються у вигляді набору зображень або фреймів із зафіксованими симптомами фітопатологій, фіксуються у підсумковому файлі разом із точними часовими мітками.

Наступним етапом є інтеграція цих часових міток з координатною інформацією, що надходить від системи позиціонування БПЛА, що дозволяє точно співвіднести просторові координати з моментами спрацьовування алгоритмів виявлення захворювань.

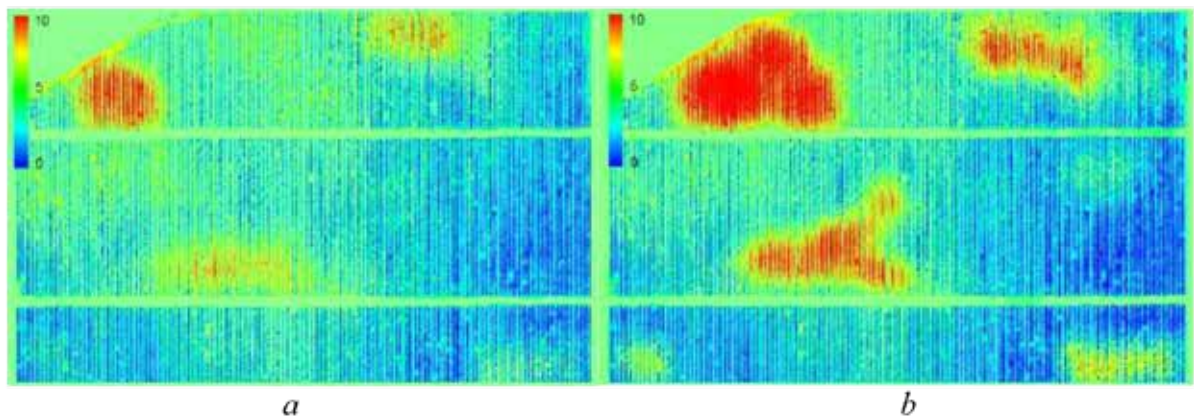


Рис. 6. Інтерактивна теплова карта фітосанітарного стану насаджень

Джерело: побудовано автором

Сучасні програмно-апаратні комплекси для інтелектуального моніторингу стану ґрунтів із використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) формують цілісну систему збору, обробки та аналітичної інтерпретації даних, що значною мірою сприяє підвищенню ефективності сільськогосподарського виробництва та управління земельними ресурсами (табл. 2). Еволюція цих технологій базується на вдосконаленні апаратних платформ, інтеграції з ГІС, використанні хмарних обчислень, а також впровадженні алгоритмізованих інструментів підтримки прийняття рішень для агрономів і менеджерів агропідприємств [7].

Таблиця 2

Перспективи розвитку автоматизованих систем управління безпілотними платформами для збору аграрних даних (побудовано автором)

Параметр	Опис
Основні компоненти	Безпілотні платформи (дрони, наземні роботи), мультиспектральні та тепловізійні сенсори, програмне забезпечення для обробки даних, геоінформаційні системи, алгоритми машинного навчання.
Методи збору даних	Дистанційне зондування з використанням безпілотних платформ, фотограмметрія, LiDAR-сканування, аналіз спектральних характеристик ґрунту та рослинного покриву.
Обробка даних	Застосування алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання, аналіз вегетаційних індексів (NDVI, NDWI), автоматична класифікація ґрунтових і рослинних характеристик.
Функції та можливості	Моніторинг вологості ґрунту, оцінка стану рослин, прогнозування врожайності, виявлення зон деградації, моделювання змін аграрних параметрів.
Інтеграція з системами	Інтеграція з геоінформаційними системами, хмарними платформами, системами точного землеробства, супутниковими даними для комплексного аналізу.
Економічна ефективність	Оптимізація витрат на моніторинг і управління ресурсами, підвищення врожайності завдяки точному внесенню добрив, зниження екологічного впливу.
Перспективи розвитку	Удосконалення сенсорів, впровадження автономних роїв безпілотників, інтеграція з IoT, розвиток алгоритмів штучного інтелекту для прогнозування та управління.

У межах аграрного сектору БПЛА використовуються в різних модифікаціях відповідно до поставлених завдань. Так, найпоширенішими є мультикоптери, які завдяки високій маневреності й точності позиціонування є ідеальними платформами для обстеження невеликих ділянок із потребою у детальному аналізі стану ґрунту та рослинності [2]. Для моніторингу великих сільськогосподарських угідь доцільно застосовувати безпілотники з фіксованим крилом, які здатні здійснювати тривалі польоти та охоплювати значні площі за один виліт. Такі апарати скорочують час на збір даних і забезпечують високу деталізацію аерофотознімків, що підвищує точність подальшого аналізу.

Ключовим елементом системи інтелектуального моніторингу ґрунтів є спеціалізовані сенсори, що встановлюються на борту БПЛА. До найбільш ефективних відносяться спектральні та мультиспектральні камери, які дозволяють проводити аналіз фотосинтетичної активності рослин, виявляти ознаки стресу культур і визначати рівень зволоження ґрунту. Тепловізори, у свою чергу, використовуються для виявлення температурних аномалій, що сигналізують про ризики посухи або локальні ділянки з дефіцитом вологи. Лідарні системи (LiDAR) забезпечують побудову тривимірних карт рельєфу, необхідних для оцінки ландшафтної структури, ерозійних процесів і просторового розподілу потенційної родючості [3].

Зібрані з БПЛА дані оперативно передаються до обчислювальних систем, де відбувається їх подальша обробка за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Провідним напрямом у цій сфері є впровадження методів штучного інтелекту, що дозволяє автоматизувати розпізнавання об'єктів, класифікацію станів ґрунтів, виявлення проблемних зон та побудову прогнозних моделей деградації ґрунтового покриву. Зокрема, глибокі нейронні мережі застосовуються для диференціації типів ґрунтів, оцінки вмісту вологи, рівня засоленості та загального стану сільськогосподарських угідь.

Висновки. У дослідженні розглянуто ключові аспекти проектування автоматизованих систем, що використовують штучні нейронні мережі, зокрема згорткові архітектури глибокого навчання. Ці системи демонструють високу ефективність у класифікації зображень, отриманих із безпілотних літальних апаратів, навіть за умов значної мінливості візуальних параметрів та обмежених обсягів навчальних даних. Вивчено роль різних вегетаційних індексів у процесі аналізу зображень, здобутих із БПЛА. Встановлено, що комбінація цих індексів із методами глибинного аналізу підвищує точність прогнозування таких показників, як врожайність, стан рослин, вологість ґрунту та загальна оцінка агроєкосистем. Проаналізовано продуктивність програмно-апаратних комплексів для автоматизованого моніторингу полів, враховуючи їхню функціональність, швидкість обробки, ресурсні потреби та сумісність із ГІС-системами та хмарними сервісами. Виявлено, що найкращі результати показують системи з гнучкою архітектурою, які підтримують реалізацію інтелектуальної обробки даних у режимі реального часу.

Визначено модель InceptionV2 як оптимальний варіант серед перевірених нейромережевих алгоритмів завдяки її високій точності класифікації, низьким апаратним вимогам та можливості масштабування в аграрних умовах. Вказана модель забезпечує надійне узагальнення при обробці різноманітних типів агровізуальних даних. Створено прототип системи моніторингу стану посівів, яка складається з БПЛА з високоякісною камерою, серверної частини для обчислень, нейромережевої моделі класифікації та інструменту для створення візуальних карт (теплових карт та картограм індексів). Запропоновано концепцію об'єднання систем управління БПЛА з інструментами точного землеробства, ГІС-платформами та цифровими картами полів, що формує єдине аналітичне середовище для управління аграрним виробництвом на основі даних, що забезпечує можливість динамічного прогнозування та прийняття рішень у реальному часі.

Список використаних джерел:

1. Берневек І. А., Головка О., Роса Т., Корнієв В., Яремко О. М. Дослідження та алгоритми інтегрованого керування групою безпілотних літальних апаратів. *ICTEE*. 2024. Вип. 4, № 2. С. 29–37. DOI: <https://doi.org/10.23939/ictee2024.02.029>.
2. Бурлака С., Далека А. Технології БПЛА для сільського господарства. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2024. № 339. С. 41. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-339-4-41>.
3. Воронько В., Воронько І. Области застосування безпілотних літальних апаратів. *Сучасний стан проведення наукових досліджень у IT-технологіях, галузях електроніки, інженерії, нанотехнологіях та транспортній сфері*. 2020. С. 122–136. DOI: <https://doi.org/10.36074/csriteenat.ed-1.08>.
4. Ворох В. В., Зацерковний В. Використання безпілотних літальних апаратів в задачах прецизійного землеробства. *Технічні науки та технології*. 2024. № 4(38). С. 336–349. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-4\(38\)-336-349](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-4(38)-336-349).
5. Кучеренко О. І., Вакалюк Т. А. Огляд технічних та програмних засобів керування БПЛА. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. № 2(89). С. 170–176. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.2.24>.
6. Македон В. В., Байлова О. О. Планування і організація впровадження цифрових технологій в діяльність промислових підприємств. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія «Економічні науки»*. 2023. Випуск 47. С. 16–26. DOI: [10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3](https://doi.org/10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3).
7. Македон В. В., Льченко Н. О. Кон'юнктура світового ринку IT-послуг в умовах економіки 4.0. *Ефективна економіка*. 2021. № 1. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=8525> (дата звернення: 05.04.2025). DOI: [10.32702/2307-2105-2021.1.8](https://doi.org/10.32702/2307-2105-2021.1.8).
8. Папуша Д. Я., Оболенков Д. Ф. Автоматизація процесів обробки геодезичних даних за допомогою штучного інтелекту та машинного навчання. *Збірник наукових праць ДонНАБА*. 2024. № 1(32). С. 36–41.

9. Савченко Я., Ягодзінський С., Литвиненко Л., Сушинський О. Апаратно-програмне забезпечення та застосування безпілотних літальних апаратів. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2024. № 3 (337). С. 41. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-337-3-41>.
10. Танасійчук С., Говорущенко Т. Аналіз методів управління БПЛА (GPS позиціонування та інтелектуальні методи управління). *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2024. № 331(1). С. 462–468. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-331-70>.
11. Юн Г. М., Медінський Д. В. Застосування безпілотних літальних апаратів у сільському господарстві. *Науковий журнал*. 2017. № 4(36). С. 335–341. DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.36.12232>.
12. Яровий О. В. Системи управління безпілотними літальними апаратами для здійснення моніторингу наземних об'єктів. *Системи управління, навігації та зв'язку: Збірник наукових праць*. 2018. № 3(49). С. 33–38. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.3.033>.
13. Makam S., Komatineni B. K., Meena S. S., et al. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): An Adoptable Technology for Precise and Smart Farming. *Discover Internet of Things*. 2024. № 4. С. 12. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43926-024-00066-5>.
14. Makedon V., Myachin V., Plakhotnik O., Fisunen N., Mykhailenko O. Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. no 2(13(128)). p. 47–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>.
15. Omer A. A., Akbari D. Smart Farming Platform Using IoT and UAVs. *Iraqi Journal for Computers and Informatics*. 2024. no 50(1). p. 151–171. <https://doi.org/10.25195/ijci.v50i1.464>.
16. Raj R., Kumar S., Lal S. P., Singh H., Pradhan J. A Brief Overview of Technologies in Automated Agriculture: Shaping the Farms of Tomorrow. *International Journal of Environment and Climate Change*. 2024. Vol. 14, No. 7. P. 181–209. DOI: <https://doi.org/10.9734/ijecc/2024/v14i74263>.
17. Shamshiri R. R., Sturm B., Weltzien C., Fulton J., Khosla R., Schirrmann M., Raut S., Basavegowda D. H., Yamin M., Hameed I. A. Digitalization of Agriculture for Sustainable Crop Production: A Use-Case Review. *Frontiers in Environmental Science*. 2024. № 12. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1375193>.
18. Zhang M., Wang S. Agricultural Unmanned Systems: Empowering Agriculture with Automation. *Agronomy*. 2024. no 14(6). p. 1203. <https://doi.org/10.3390/agronomy14061203>.

УДК 004.896:378.147:004.42

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.18>

Ірина МИХАЙЛЮК

кандидат педагогічних наук, доцент,
доцент кафедри інженерії програмного забезпечення,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
iryna.mykhailiuk@nung.edu.ua
ORCID: 0000-0002-6489-3982

Ольга МУРАВА

студентка II курсу факультету інформаційних технологій,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
olha.murava-ip231@nung.edu.ua

ВПРОВАДЖЕННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС ПРИ ВИВЧЕННІ ДИСЦИПЛІНИ «ОСНОВИ ПРОГРАМУВАННЯ МОВОЮ СІ»

Анотація. У статті досліджуються можливості впровадження штучного інтелекту (ШІ) у навчальний процес із дисципліни «Основи програмування мовою Сі».

Мета дослідження – вивчення шляхів інтеграції ШІ в освітній процес для підвищення ефективності навчання програмуванню мовою Сі. Враховуючи ключову роль мови Сі в IT-освіті, її опанування є важливим етапом для студентів, які прагнуть розвивати навички програмування та працювати з сучасними мовами, такими як C++, Java чи Python. Окрім того, знання мови Сі необхідні для професійної діяльності в галузях, пов'язаних із розробкою операційних систем, драйверів та вбудованих систем.

Методологія дослідження базується на аналізі сучасних наукових джерел, що розглядають питання застосування ШІ у навчальному процесі. Основна увага приділяється алгоритмам автоматизації перевірки програмного коду, методам аналізу ефективності алгоритмів, а також персоналізованому підходу до навчання студентів. У статті розглядаються механізми інтеграції ШІ у навчальний процес, зокрема автоматичне виявлення та аналіз помилок у коді, оптимізація алгоритмів, генерація тестових завдань та можливості доповнення програмного коду.

Наукова новизна дослідження полягає у практичному підході до інтеграції ШІ в навчання мовою Сі. Використання інтелектуальних систем дозволяє адаптувати освітній процес до рівня підготовки студентів, що сприяє глибшому розумінню принципів програмування та підвищенню їхньої компетентності у роботі з алгоритмами та структурами даних. Особливий акцент зроблено на взаємодії студента з ШІ, де алгоритми аналізують помилки, пропонують виправлення та надають миттєвий зворотний зв'язок, що підсилює навчальний

Висновки статті підкреслюють перспективність використання ШІ в освітньому процесі. Основні переваги впровадження таких технологій включають адаптивність навчання, швидкий доступ до зворотного зв'язку, можливість створення варіативних завдань та розвиток практичних навичок студентів. Впровадження ШІ у навчання мовою Сі дозволяє не лише підвищити ефективність засвоєння матеріалу, але й зробити освітній процес більш інтерактивним та цікавим для студентів.

Ключові слова: штучний інтелект, мова програмування Сі, автоматизація, персоналізація навчання, оптимізація алгоритмів.

Iryna MYKHAILIYK, Olha MURAVA. INTEGRATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE INTO THE EDUCATIONAL PROCESS FOR TEACHING THE DISCIPLINE «FUNDAMENTALS OF PROGRAMMING IN C LANGUAGE»

Abstract. The article explores the possibilities of integrating artificial intelligence (AI) into the educational process for the course «Fundamentals of Programming in C».

The aim of the study is to examine ways of integrating AI into education to improve the effectiveness of learning programming in C. Given the key role of the C language in IT education, mastering it is an essential step for students who aspire to develop programming skills and work with modern languages such as C++, Java, or Python. Additionally, knowledge of C is crucial for professional activities in fields related to operating system development, drivers, and embedded systems.

The research methodology is based on the analysis of modern scientific sources that discuss the application of AI in education. The primary focus is on algorithms for automating code verification, methods for analyzing algorithm efficiency, and personalized approaches to student learning. The article examines AI integration mechanisms in education, including automatic error detection and analysis in code, algorithm optimization, test task generation, and code augmentation.

The scientific novelty of the study lies in its practical approach to integrating AI into C language education. The use of intelligent systems enables the adaptation of the educational process to the students' level of preparation, fostering a deeper understanding of programming principles and enhancing their competence in working with algorithms and data structures. Special emphasis is placed on student interaction with AI, where algorithms analyze errors, suggest corrections, and provide instant feedback, strengthening the learning effect. Another important aspect of the study is the evaluation of the effectiveness of an interactive learning approach, implemented through adaptive algorithms and automated learning platforms.

The article's conclusions highlight the promising prospects of AI usage in education. The key benefits of implementing such technologies include adaptive learning, quick access to feedback, the ability to create variable tasks, and the development of students' practical skills. AI integration into C language education not only enhances material comprehension efficiency but also makes the learning process more interactive and engaging for students.

Key words: artificial intelligence, C programming language, automation, personalized learning, algorithm optimization.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Впровадження штучного інтелекту (ШІ) в освітній процес стає важливим напрямом розвитку сучасної освіти, особливо у сфері технічних наук. Одним із найактуальніших питань є інтеграція ШІ у навчання програмуванню, зокрема дисципліни «Основи програмування мовою Сі». Традиційні методи викладання часто не відповідають швидким змінам у технологічному середовищі, що створює додаткові труднощі для студентів та викладачів. Студенти стикаються з проблемами в розумінні базових концепцій програмування, таких як структури даних, цикли та функції, а викладачі витрачають значний час на перевірку рутинних завдань і пояснення типових помилок.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Сучасні дослідження демонструють високий потенціал використання ШІ для розв'язання цих проблем. У статті [3] акцентується увага на важливості інтеграції ШІ в навчальні програми, його ролі у створенні персоналізованих стратегій викладання та адаптації матеріалів до рівня знань студентів. Дослідження [2] зосереджується на тому, як штучний інтелект сприяє автоматизації оцінювання завдань, генеруванню персоналізованих рекомендацій та забезпеченню зворотного зв'язку. Висновки авторів підкреслюють можливості оптимізації навчального процесу завдяки таким технологіям.

Робота [6] аналізує вплив адаптивних алгоритмів на ефективність навчання студентів з різним рівнем підготовки. Автори розглядають, як ці технології можуть персоналізувати навчальний процес та покращити засвоєння матеріалу відповідно до індивідуальних потреб студентів. У статті розглядаються такі інструменти, як CodeSignal, LeetCode і HackerRank, які забезпечують автоматичне оцінювання коду, аналіз помилок і адаптивні рекомендації. Автори також зазначають, що такі платформи найбільше використовуються студентами молодшого віку.

Особливу увагу питанням інтерактивного навчання з використанням ШІ приділено в роботі [8]. Дослідники підкреслюють важливість інтеграції ШІ для створення інтерактивних матеріалів і забезпечення оперативного зворотного зв'язку, що сприяє підвищенню якості навчання.

Наукові публікації [1] висвітлюють етичні аспекти впровадження ШІ у навчання, зокрема забезпечення рівного доступу до технологій і мінімізацію ризиків залежності від автоматизованих рішень.

Таким чином, аналіз сучасних досліджень свідчить про значний потенціал впровадження ШІ у навчальний процес дисципліни «Основи програмування мовою Сі».

Метою цієї статті є дослідження можливостей використання ШІ для автоматизації рутинних завдань, персоналізації навчання та адаптації матеріалів до потреб студентів. Основна увага приділяється підвищенню ефективності навчання через автоматизацію перевірки коду, персоналізацію навчальних завдань та розвиток критичного мислення й практичних навичок студентів.

Виклад основного матеріалу

Значення мови програмування Сі. Мова програмування Сі є однією з найважливіших для студентів ІТ-спеціальностей. Її значення важко переоцінити, адже саме Сі часто стає базою, з якої починається знайомство з програмуванням і розробкою програмного забезпечення [7, 10]. Вивчення цієї мови забезпечує розуміння фундаментальних принципів алгоритмізації та структурування програм, що є основою для подальшого освоєння сучасних мов програмування, таких як C++, Java чи Python.

Однією з ключових причин вивчення Сі є її ефективність і продуктивність. Завдяки можливості прямого управління пам'яттю та низькорівневим особливостям, Сі дозволяє створювати програми, які працюють максимально швидко та оптимально використовують ресурси системи. Це робить її незамінною в таких галузях, як розробка операційних систем, драйверів та програмного забезпечення для вбудованих систем [9]. Для студентів, які планують працювати у цих сферах, знання Сі є важливою складовою професійної компетенції.

Крім того, Сі використовується у багатьох сферах: від вбудованих систем і наукових обчислень до ігрової індустрії. Це універсальна мова, яка залишається актуальною протягом десятиліть. Її стабільність та широке застосування гарантують, що знання Сі завжди будуть корисними для будь-якого ІТ-спеціаліста.

Інтеграція ШІ у вивчення мови програмування Сі. ШІ має великий потенціал у вдосконаленні навчального процесу [10], зокрема, програмуванню мовою Сі. Одним із важливих аспектів є автоматизація перевірки коду. Інтелектуальні алгоритми здатні аналізувати код студентів, знаходити помилки та навіть пояснювати їх суть. Наприклад, після завантаження програми з помилкою, ШІ знаходить помилку та в коментарях описує проблему (рис. 1):

```
int main() {
    int x;
    printf("%d", x); // Помилка: змінна не ініціалізована.
    return 0;
}
```

Рис. 1. ШІ вказує на помилку у програмному коді

ШІ може запропонувати рекомендації для виправлення (рис. 2):

```
int main() {
    int x = 0;
    printf("%d", x); // Проблема вирішена.
    return 0;
}
```



Рис. 2. ШІ виправляє помилку

Розглянемо практичні завдання з використанням ШІ:

1. Завдання з доповнення коду. ШІ пропонує шаблон функції, а студент має завершити її (рис. 3):

```
int findMax(int arr[], int n) {
    int max = arr[0];
    // Ваш код тут
    return max;
}
```

Рис. 3. Запропонований ШІ шаблон функції

Завдання для студента: завершити функцію для знаходження максимального/мінімального елемента.

Студенти вчаться правильно визначати параметри та повертати значення функцій, використовувати порівняння для аналізу даних, застосовувати ітерацію для обробки списку значень та розвивати самостійне мислення, що допомагає у творчому розв'язанні задач

2. Аналіз помилок. ШІ може генерувати код із навмисно внесеними помилками, які студенти повинні виявити та виправити (рис. 4):

```
int sumArray(int arr[], int n) {
    int sum = 0;
    for (int i = 0; i <= n; i++) { // Помилка: цикл виходить за межі масиву
        sum += arr[i];
    }
    return sum;
}
```



Рис. 4. Згенерований ШІ код з помилками

Аналіз помилок у коді допомагає студентам зрозуміти причини виникнення помилок, розвиває аналітичні навички та готує їх до вирішення складніших завдань у майбутньому.

3. *Оптимізація алгоритмів.* Оптимізація коду полягає у створенні програм, які працюють швидше, займають менше пам'яті та є більш зрозумілими для інших розробників. ШІ допомагає студентам зрозуміти ключові принципи ефективного кодування та розвиває у них важливі навички

ШІ може пропонувати студентам базовий алгоритм, який потребує вдосконалення (рис. 5).

```
void bubbleSort(int arr[], int n) {
    for (int i = 0; i < n - 1; i++) {
        for (int j = 0; j < n - i - 1; j++) {
            if (arr[j] > arr[j + 1]) {
                int temp = arr[j];
                arr[j] = arr[j + 1];
                arr[j + 1] = temp;
            }
        }
    }
}
```

Рис. 5. Згенерований ШІ фрагмент програми для оптимізації

Завдання для студента: замінити алгоритм сортування на більш ефективний, наприклад, швидке сортування (quick sort) (рис. 6).

```
void quickSort(int arr[], int low, int high) {
    if (low < high) {
        int pi = partition(arr, low, high);
        quickSort(arr, low, pi - 1);
        quickSort(arr, pi + 1, high);
    }
}
```

Рис. 6. Приклад швидкого сортування

4. *Генерація тестів.* ШІ допомагає створювати тести для перевірки функцій, наприклад, для перевірки сортування масиву (рис. 7).

```
void testSortingAlgorithm() {
    int testArray[] = {5, 3, 8, 1, 2};
    quickSort(testArray, 0, 4);
    // Перевірка результату
    for (int i = 0; i < 4; i++) {
        if (testArray[i] > testArray[i + 1]) {
            printf("Тест провалено.\n");
            return;
        }
    }
    printf("Тест пройдено успішно.\n");
}
```

Рис. 7. Згенерована ШІ функція для перевірки сортування масиву

Завдання для студента: розробити власні тести для інших функцій, таких як пошук мінімального елемента чи підрахунок суми елементів.

Ця програма демонструє базову ідею тестування функцій. Вона легко модифікується для інших цілей, зокрема для: *перевірки правильності математичних функцій* (розрахунок факторіалів, піднесення до степеня, знаходження кореня числа, обчислення середнього, мінімального або максимального значення в масиві); *автоматизації тестування логічних функцій* (перевірка, чи є число простим, знаходження найбільшого спільного дільника (НСД), перевірка парності числа); *роботи з рядками* (підрахунок довжини рядка, перетворення рядка у верхній або нижній регістр, перевірка, чи є рядок паліндромом); *тестування масивів* (сортування масиву, пошук елемента в масиві, перевірка, чи є масив симетричним)

Крім технічних аспектів, використання ШІ у навчанні сприяє розвитку важливих м'яких навичок, таких як критичне мислення та творчий підхід до вирішення задач [4]. Студенти під час роботи з кодом навчаються критично оцінювати його структуру та логіку. Вони повинні розуміти, як працює кожен рядок коду, яка його мета та чи правильно він взаємодіє з іншими частинами програми. Завдяки такому аналізу студенти розвивають уважність до деталей, розуміння алгоритмів і логічне мислення.

Використання ШІ дозволяє студентам експериментувати з різними підходами до розв'язання задач [10]. Наприклад, ШІ може запропонувати кілька різних способів обробки даних, а студент обирає оптимальний. Це мотивує студентів до пошуку нестандартних рішень і глибшого аналізу задач.

Отже, переваги впровадження ШІ у навчальний процес:

1. Автоматизація перевірки завдань. ШІ швидко аналізує код, виявляє помилки та надає пояснення, що економить час викладачів і забезпечує студентам миттєвий зворотний зв'язок.
2. Персоналізація навчання. Завдяки адаптивним алгоритмам ШІ налаштовує рівень складності завдань під кожного студента.
3. Генерація варіативних завдань. ШІ дозволяє створювати різні варіанти однієї задачі, що сприяє зменшенню ризику списування.
4. Розвиток практичних навичок. Студенти отримують можливість розвивати навички оптимізації, аналізу та творчого підходу.

Висновки та перспективи дослідження. Мова програмування Сі залишається важливим елементом ІТ-освіти завдяки своїй універсальності, ефективності та низькорівневим можливостям. Її вивчення формує фундаментальні навички, необхідні для розуміння принципів програмування та роботи з сучасними мовами. Водночас впровадження ШІ у процес навчання мови Сі відкриває нові можливості для вдосконалення освітнього процесу.

ШІ дозволяє автоматизувати рутинні завдання, такі як перевірка коду, оцінювання ефективності алгоритмів і генерація тестів. Це не лише підвищує якість навчання, а й звільняє час викладачів для фокусування на більш складних аспектах викладання. Крім того, персоналізація навчання за допомогою адаптивних алгоритмів сприяє глибшому засвоєнню матеріалу, надаючи кожному студенту завдання, що відповідають його рівню підготовки.

Особливо цінним є внесок ШІ у розвиток критичного мислення та творчого підходу. Завдяки аналізу помилок, оптимізації алгоритмів і пошуку нестандартних рішень студенти вчаться критично оцінювати код, розуміти його структуру та пропонувати інноваційні ідеї. Інтерактивні завдання, створені з використанням ШІ, допомагають студентам не лише засвоювати технічні знання, але й формувати важливі практичні навички.

Таким чином, впровадження ШІ у навчальний процес дисципліни «Основи програмування мовою Сі» відкриває значний потенціал для покращення якості освіти, підвищення ефективності навчання та підготовки студентів до сучасних викликів у галузі технологій.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на створення інтерактивних платформ та розробку методик, які дозволять максимально ефективно інтегрувати ШІ у процес навчання програмуванню. Особливу увагу слід приділити використанню ШІ для аналізу прогресу студентів, виявлення їхніх індивідуальних потреб і надання персоналізованих рекомендацій, що сприятиме ще більш ефективному засвоєнню матеріалу та розвитку професійних компетенцій.

Список використаних джерел:

1. Afshan Younas, Subramanian Kabaly, Al-Haziati Mohammed, Hussainy Syed, Kindi Ahmed. A Review on Implementation of Artificial Intelligence in Education. *International Journal of Research and Innovation in Social Science*. 2023. VII. С. 1092–1100. URL: https://www.researchgate.net/publication/373983762_A_Review_on_Implementation_of_Artificial_Intelligence_in_Education (date of access: 24.04.2025)

2. Babajanov M. R., Ishniyazov O. O. Use of Innovative Technologies to Learn Programming. *Journal of Science, Research and Teaching*. 2024. Vol. 3, No. 6. URL: <https://jsrt.innovascience.uz/index.php/jsrt/article/view/564/469> (date of access: 24.04.2025)
3. Huang Chien-Hsing. Programming Teaching in the Era of Artificial Intelligence. *Eximia Journal*, 2024. Vol. 13, С. 583–589, January. URL: <https://eximiajournal.com/index.php/eximia/article/view/488/325> (date of access: 24.04.2025)
4. Джонатан Хейбер. Критичне мислення. 2023. Видавництво: ArtHuss. 198 с.
5. Коваль О. Використання штучного інтелекту в процесі навчання програмування в умовах змішаного навчання. *Відкрите освітнє е-середовище сучасного університету*. 2024. № 5. С. 1–15. URL: <https://openedu.kubg.edu.ua/journal/index.php/openedu/article/view/543> (дата звернення: 24.04.2025)
6. Литвинова С., Рашевська Н., Проскура С. The use of artificial intelligence in teaching students programming languages. *Proceedings of the IX International Workshop on Professional Retraining and Life-Long Learning using ICT (3L-Person 2024)*. 2024. С. 10–29. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3781/paper01.pdf> (date of access: 24.04.2025)
7. Ma B., Chen L., Konomi S. Enhancing Programming Education with ChatGPT: A Case Study on Student Perceptions and Interactions in a Python Course. arXiv preprint arXiv:2403.15472. 2024. URL: <https://arxiv.org/abs/2403.15472> (date of access: 24.04.2025)
8. Отрошко Т., Школа О., Калініченко О. Впровадження штучного інтелекту в освітній процес магістрантів-інформатиків. *Distance Education in Ukraine: Innovative, Normative-Legal, Pedagogical Aspects*. 2024. С. 351–356. URL: https://www.researchgate.net/publication/383560632_VPROVADZENNA_STUCNOGO_INTELEKTU_V_OSVITNIJ_PROCES_MAGISTRANTIV-INFORMATIKIV (дата звернення: 24.04.2025)
9. Phung T., Pădurean V.-A., Cambroner J., Gulwani S., Kohn T., Majumdar R., Singla A., Soares G. Generative AI for Programming Education: Benchmarking ChatGPT, GPT-4, and Human Tutors. arXiv preprint arXiv:2306.17156. 2023. URL: <https://arxiv.org/abs/2306.17156> (date of access: 24.04.2025)
10. Яценко О. Технології штучного інтелекту: основні напрями впровадження в освіту. *Наукові записки. Серія: Педагогічні науки*. 2023. № 3. С. 378–382. URL: <https://eprints.zu.edu.ua/37808/1/Yatsenko.pdf> (дата звернення: 24.04.2025)

УДК 004.8

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.19>

Віктор ОБОДЯК

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри кібербезпеки,
Сумський державний університет, v.obodyak@cs.sumdu.edu.ua

ORCID: 0000-0002-8539-1252

Михайло ОТРОЩЕНКО

аспірант кафедри комп'ютерних наук,
Сумський державний університет, m.otroshenko@ias.sumdu.edu.ua

ORCID: 0000-0001-5064-6780

ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА МАШИННОГО НАВЧАННЯ В НАУКОМЕТРИЧНИХ СИСТЕМАХ ТА БАЗАХ ДАНИХ

Анотація. У сучасному науковому середовищі використання інноваційних технологій у системах управління науковими публікаціями, зокрема штучного інтелекту та машинного навчання, відіграє ключову роль у підвищенні ефективності та точності обробки та аналізу великих обсягів наукової інформації. Це дослідження спрямоване на вивчення потенціалу та переваг використання штучного інтелекту та машинного навчання у системах управління науковими публікаціями.

Мета цього дослідження – розкрити потенціал штучного інтелекту та машинного навчання для покращення ефективності управління науковими публікаціями.

В аналізі останніх досліджень і публікацій виявлено, що використання штучного інтелекту дозволяє автоматизувати процеси класифікації та аналізу наукових публікацій, що допомагає у виявленні нових наукових трендів та підвищує швидкість прийняття рішень. Машинне навчання ж забезпечує можливість створення прогностичних моделей, що допомагають у прогнозуванні розвитку наукових дисциплін та визначенні їх впливу.

У статті аналізуються сучасні підходи до управління науковими публікаціями та вивчаються можливості використання штучного інтелекту та машинного навчання для їх оптимізації. Розглядаються також проблеми точності та об'єктивності оцінювання наукової активності, які можуть бути вирішені за допомогою інноваційних технологій.

Наукова новизна цієї роботи полягає в дослідженні та аналізі використання штучного інтелекту та машинного навчання в системах управління науковими публікаціями з фокусом на наукометричних системах та базах даних.

Результати аналізу свідчать про те, що інтеграція інноваційних технологій у системи управління науковими публікаціями значно покращить якість та швидкість обробки наукової інформації, а також сприятиме об'єктивній оцінці наукової діяльності. Пропонується врахувати ці результати при розробці та вдосконаленні систем управління науковими публікаціями для забезпечення більш ефективного та інноваційного підходу до наукової діяльності.

Ключові слова: інноваційні технології, машинне навчання, наукометрія, управління науковими публікаціями, штучний інтелект.

Viktor OBODIAK, Mikhailo OTROSHKENKO. THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND MACHINE LEARNING IN SCIENTOMETRIC SYSTEMS AND DATABASES

Abstract. In today's scientific environment, the use of innovative technologies in scientific publication management systems, in particular artificial intelligence and machine learning, plays a key role in improving the efficiency and accuracy of processing and analysing large amounts of scientific information. This study aims to explore the potential and benefits of using artificial intelligence and machine learning in scientific publication management systems.

The main purpose of this study is to unlock the potential of artificial intelligence and machine learning to improve the efficiency of scientific publication management.

An analysis of recent research and publications has shown that the use of artificial intelligence allows automating the processes of classifying and analysing scientific publications, which helps to identify new scientific trends and increases the speed of decision-making. Machine learning, on the other hand, provides the ability to create predictive models that help forecast the development of scientific disciplines and determine their impact.

The article analyses modern approaches to managing scientific publications and explores the possibilities of using artificial intelligence and machine learning to optimise them. The article also considers the problems of accuracy and objectivity of scientific activity assessment, which can be solved with the help of innovative technologies.

The scientific novelty of this work is to study and analyse the use of artificial intelligence and machine learning in scientific publication management systems with a focus on scientometric systems and databases.

The results of the analysis indicate that the integration of innovative technologies into scientific publication management systems will significantly improve the quality and speed of processing scientific information, as well as contribute to an objective assessment of scientific activity. It is suggested that these results should be taken into account when developing and improving scientific publication management systems to ensure a more efficient and innovative approach to scientific activity.

Key words: innovative technologies, machine learning, scientometrics, scientific publication management, artificial intelligence.

Актуальність теми дослідження і постановка проблеми. Сьогодні існує висока потреба сучасного наукового співтовариства у розвитку ефективних інструментів управління науковими публікаціями в умовах постійного зростання обсягів наукової інформації. Застосування інноваційних технологій, таких як штучний інтелект (ШІ) та машинне навчання (МН), у системах управління науковими публікаціями виявляється ключовим для підвищення ефективності обробки, аналізу та використання цієї інформації.

Проблема полягає у складнощах, пов'язаних з обробкою та аналізом великого обсягу наукових даних, що стає перешкодою для швидкого та точного прийняття рішень у сфері наукових досліджень. Крім того, існує проблема недостатньої об'єктивності та точності оцінювання наукової активності та впливу наукових публікацій, що ускладнює оцінку результативності дослідницької роботи та прийняття стратегічних управлінських рішень.

Враховуючи вищезазначені обставини, використання інноваційних технологій, таких як штучний інтелект та машинне навчання, в системах управління науковими публікаціями стає нагальною потребою, що вимагає подальших досліджень та розробки нових підходів для оптимізації процесів управління науковою інформацією.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженнями наукометрії та наукометричних систем і баз даних займалися Загоруйко І. В., Луніна К. І., Мриглод О. І., Назаровець С. А. та інші [2-5, 7]. Вчені зробили значний внесок у розвиток наукометрії та наукометричних систем і баз даних та продовжують активно працювати у цій області для покращення управління науковими публікаціями для підвищення ефективності наукової діяльності. В роботах Григорово О. В., Карапетяна О. М., Колеснікова А. П. та інших досліджується штучний інтелект на машинне навчання [1, 6]. Вони відомі своїми внесками у вдосконалення методів та моделей штучного інтелекту, а також застосуванням машинного навчання в різних сферах.

В ході дослідження було проведено аналіз наукометричних систем та баз даних, таких як Scopus, Web of Science, PLOS, Google Scholar та ORCID [8-9, 11, 13]. Дослідження включало вивчення функціоналу кожної системи, їх можливостей та особливостей у відстеженні цитувань наукових публікацій.

Формулювання мети статті. Мета дослідження полягає у вивченні та аналізі інноваційних технологій, зокрема штучного інтелекту та машинного навчання, в контексті застосування в системах управління науковими публікаціями. Основними завданнями дослідження є:

- аналіз сучасних підходів до управління науковими публікаціями;
- вивчення застосування штучного інтелекту в наукометричних системах та базах даних;
- дослідження можливостей машинного навчання в управлінні науковими публікаціями;
- розробка пропозицій щодо вдосконалення систем управління науковими публікаціями.

Виклад основного матеріалу. У багатьох країнах впроваджено національні системи оцінювання наукової успішності. Наукові установи повинні дотримуватися певних «правил гри» і звітувати за використане державне фінансування. Багато європейських країн дотримуються принципу обережного використання кількісних методів при аудиті та моніторингу наукової сфери. Для оцінки значення наукових результатів корисними можуть бути бібліометричні дані та інформація з альтернативних джерел, таких як соціальні мережі, блогосфера, медіа тощо. Оцінка цих результатів важлива не лише для науки, а й для розвитку промисловості та суспільства в цілому [4].

В Україні активно впроваджується практика використання баз даних наукових цитувань, бібліометрії та інструментів наукометрії для оцінювання результатів наукової діяльності окремих вчених, наукових колективів та журналів. Деякі наукометричні показники є обов'язковими при поданні заявок для участі в конкурсах науково-дослідних робіт і підготовці щорічних звітів про діяльність освітніх та наукових установ [4].

У вітчизняних нормативних документах, що регулюють процес оцінювання наукової успішності вчених, колективів, видань та установ на національному рівні, не конкретизовано цілей і способів використання зібраних метрик. Однак, оскільки такі кількісні оцінювання і порівняння надають певні переваги обраним суб'єктам, можна припускати, що наукометричні показники використовуються в якості критеріїв оцінки наукової успішності. Проте, на відміну від найкращих світових практик, в українських методиках оцінювання не так чітко визначено обмеження щодо використання кількісних метрик. Більше того, можна спостерігати спроби застосувати інструментарій наукометрії без розуміння того, для яких завдань він призначений [4].

В нормативних документах України часто вважають за критерій оцінки діяльності наукових і науково-педагогічних працівників лише наявність публікацій у періодичних виданнях, які включені до Scopus та Web of Science. Наприклад, відповідно до ліцензійних умов провадження освітньої діяльності, заклад освіти повинен надати інформацію про наявність у працівників статей у виданнях,

представлених у Scopus або Web of Science Core Collection, а також про кількість наукових журналів, що видаються закладом освіти й індексуються у згаданих базах. Згідно з порядком присвоєння вчених звань науковим і науково-педагогічним працівникам, для отримання вченого звання професора або доцента необхідна наявність публікацій у періодичних виданнях, які включені до Scopus або Web of Science [4].

Сучасний інструментарій наукометрії, дисципліни, що описує наукову діяльність кількісно, є досить розвиненим і різноманітним. Однак, важливо розуміти, що через природу наукометрії неможливо передбачити непередбачуване. Не існує жодного кількісного критерію, який однозначно вказував би на майбутнього нобелівського лауреата або дозволяв негайно виокремити геніальну ідею серед мільйона інших. Проте сила наукометрії полягає в її різноманітності. З однієї сторони, епоха Big Data надає безмежний ресурс для аналізу, з іншої – розвиток методів аналізу даних дозволяє здійснювати багатовекторне оцінювання наукового процесу [4].

Пошук інформації є важливою частиною наукової роботи. Успішному вченому потрібно знати про найновіші результати досліджень у своїй галузі, встановлювати, хто ще працює над цією проблемою, визначати, які журнали публікують відповідні статті, які конференції присвячені цій тематиці, та визначати, хто фінансує проведення досліджень у галузі. У світі щодня з'являється велика кількість наукових публікацій, тому майже неможливо перечитати «від А до Я» всі роботи у своїй сфері. Для ефективного використання свого часу та уникнути перегляду застарілих публікацій, науковці використовують спеціальні пошукові техніки та інструменти. Сучасні пошукові наукові системи та бази даних цитувань дозволяють користувачам знаходити рецензовані публікації та отримувати інформацію про джерела та кількість цитувань таких публікацій [5].

Зростання кількості наукових публікацій є значним викликом для наукової спільноти. За даними ScienceAdvisor [12] кількість опублікованих робіт «зросла в геометричній прогресії». У 2016 р. близько 1,92 млн. робіт були проіндексовані базами даних публікацій Scopus та Web of Science. У 2022 р. ця цифра виросла до 2,82 млн. Це ускладнює вченим завдання відстеження нових досліджень у своїй галузі та знаходження релевантної інформації. Існує ряд проблем, пов'язаних з управлінням науковими публікаціями, зокрема:

- відкритий доступ: не всі наукові публікації доступні у вільному, що обмежує доступ до них для багатьох дослідників;
- якість робіт: не всі наукові публікації мають однаково високу якість, що призводить до поширення неперевіреної інформації;
- плагіат: який призводить до анулювання публікацій та інших санкцій;
- відсутність стандартизації: різні журнали мають різні формати та вимоги до публікацій, що ускладнює підготовку та публікацію своїх досліджень.

Використання інноваційних технологій, таких як штучний інтелект та машинне навчання, стає все більш важливим у процесі управління науковими публікаціями. Штучний інтелект з'явився в 1950-х роках і викликав великий інтерес. В роботі Колеснікова А. та Карапетяна О. [1] штучний інтелект розглядається як комп'ютерні системи, які можуть не лише виконувати завдання за певними алгоритмами, а й вирішувати творчі завдання шляхом аналізу великої кількості різноманітної інформації та імітації процесів мислення людини. Уже в 1980-х роках стає популярним машинне навчання – це клас методів штучного інтелекту, що відрізняється від прямого рішення завдання тим, що воно полягає в навчанні під час застосування рішень до багатьох схожих одна на одну задач. Основна ідея машинного навчання полягає в тому, що системи можуть покращувати свою ефективність з часом, вчитися на нових даних, не потребуючи постійного ручного переписування коду [6].

Через зростання кількості наукових публікацій дослідникам стає складніше знаходити й відстежувати релевантні дослідження. Штучний інтелект та машинне навчання допомагають в автоматизації таких завдань, як пошук літератури, анотування та категоризація наукових статей. Такі технології дають змогу допомогти в деяких аспектах рецензування, таких як перевірка на плагіат, оцінка методології та виявлення потенційних упереджень.

Наукометричні системи та бази даних відіграють все більш важливу роль у сучасному науковому середовищі. Наукометрична база даних – це база даних, яка містить наукові публікації або посилання на них, разом із інструментами для відстеження цитувань статей, опублікованих у наукових виданнях. Ці бази даних допомагають науковцям проводити дослідження, залучати увагу наукової спільноти та брати участь у спільних проектах [2]. Вони використовуються для:

- оцінки наукової продуктивності (вимірювання впливу наукових публікацій та дослідників; порівняння результатів досліджень в різних галузях та країнах; визначення пріоритетів при розподілі наукових грантів та ресурсів тощо);

- аналізу наукових трендів (виявлення нових напрямків досліджень; відстеження розвитку наукових галузей; визначення пріоритетів для наукової політики тощо);
- сприяння науковій співпраці (пошук потенційних партнерів для досліджень; знаходження інформації про дослідницькі групи та проекти; створення наукових мереж тощо);
- підвищення прозорості наукової діяльності (надання інформації про результати досліджень широкому загалу; сприяння відповідальності науковців; боротьба з науковою фальсифікацією тощо).

Наукометричні системи та бази даних відіграють важливу роль у вимірюванні наукової продуктивності. Найбільш відомими наукометричними базами даних є Scopus та Web of Science. Web of Science або Web of Knowledge – це пошукова платформа, яка об'єднує реферативні бази даних публікацій у наукових журналах та патентів, включаючи бази даних, що враховують взаємне цитування публікацій. Web of Science є аналітичною базою даних, яка охоплює матеріали з різних галузей наук. Ця система має вбудовані функції пошуку, аналізу та управління бібліографічною інформацією [2].

Scopus – це одна з найбільших бібліографічних і реферативних баз даних, а також інструмент для відстеження цитованості статей, які публікуються у наукових виданнях. Ця база даних індексує наукові журнали, матеріали конференцій та серійні книжкові видання, і доступна на умовах передплати через веб-інтерфейс [2].

На теренах України найбільш використовуваними є бази Google Scholar і ORCID. Кожна з них має свої особливості. Google Scholar – це безкоштовна пошукова система, яка індексує наукові публікації з різних джерел, включаючи журнали, книги, веб-сайти та репозиторії. Google Scholar не є реферативною базою даних, тому не всі публікації, що в ній знаходяться, рецензуються. ORCID (Open Researcher and Contributor ID) – наукометрична база даних, яка була створена у 2012 р. з девізом «Єднати дослідників і дослідниць». ORCID присвоює кожному користувачеві унікальний 16-значний ідентифікатор [3].

Наукометричні системи дозволяють дослідникам, установам та урядам оцінювати кількість публікацій, авторство, співавторство, індекс Гірша (h-індекс) та інші показники публікаційної активності. Вони дають змогу дослідникам, установам та урядам оцінювати впливовість наукових публікацій, використовуючи кількість цитувань, імпакт-фактор журналу та інші показники. За допомогою цих систем можна відстежувати динаміку розвитку науки в цілому та в окремих галузях знань.

Збільшення обсягів наукових публікацій та розмаїття джерел інформації створюють значні виклики для наукової спільноти. Однією з найважливіших проблем є перевантаження інформацією, коли дослідники мають складнощі з визначенням найбільш авторитетних джерел та ефективним використанням накопичених даних. Зростання обсягів публікацій також призводить до збільшення конкуренції за увагу та фінансування, що ускладнює вибір наукових робіт для вивчення та цитування.

Розмаїття джерел інформації також породжує проблему відсутності стандартизованих методів оцінки якості наукових джерел, що призводить до поширення неперевіраних або ненадійних даних, що підбиває довіру до наукової інформації. Більше того, деякі галузі науки стикаються з проблемою недостатньої представленості у наукових виданнях, що ускладнює обмін знаннями та розвиток цих галузей. Для подолання цих викликів наукова спільнота шукає нові підходи до оцінки якості досліджень та джерел інформації, розвиває інструменти для автоматизації пошуку та аналізу даних, а також працює над створенням стандартів та рекомендацій для вибору найкращих джерел інформації.

В наш час штучний інтелект використовується в системах управління науковими публікаціями для покращення ефективності та точності багатьох аспектів наукового публікаційного процесу. Він використовується при рецензуванні, редагуванні, пошуку публікацій та аналітиці. Сьогодні штучний інтелект активно використовується для автоматичного аналізу статей на наявність плагіату, граматичних помилок та інших проблем. Він допомагає в прийнятті рішення щодо прийняття/відхилення публікацій, надаючи рецензентам відповідну інформацію та рекомендації. Авторам допомагає правильно формувати свої рукописи відповідно до вимог журналу. Технології штучного інтелекту широко використовуються для автоматичної класифікації наукових статей за темами та дисциплінами. Одним із важливих способів використання ШІ в управлінні публікаційною діяльністю є виявлення випадків наукового шахрайства, таких як фальсифікація даних або плагіат [10].

Використання штучного інтелекту наукометричними системами та базами різноманітне. Elsevier використовує систему SciVal, засновану на штучному інтелекті, для аналізу даних про публікації та відстеження впливу досліджень. Elsevier SciVal – це онлайн-платформа, яка використовує методи штучного інтелекту для аналізу даних про наукові публікації. Вона допомагає дослідникам, установам та фінансуючим організаціям оцінювати вплив досліджень, відстежувати тенденції та виявляти можливості співпраці. SciVal дозволяє користувачам отримати загальне уявлення про дослідницьку діяльність у конкретній галузі. Дає можливість побачити, які установи та дослідники є провідними

у певній сфері, які теми зараз активно досліджуються та як розвиваються дослідження з часом. SciVal використовує різні показники, такі як цитування та альтернативні метрики впливу, щоб допомогти оцінити вплив окремих досліджень, авторів, журналів та установ. Ця система допомагає знайти потенційних співавторів, досліджуючи спільні публікації та дослідницькі інтереси. SciVal отримує дані з Scopus, однієї з найбільших баз даних рецензованих наукових публікацій, що забезпечує охоплення та надійність даних. Застосування III дозволяє SciVal здійснювати більш складний аналіз даних та пропонувати більш корисні інсайти [7].

PLOS (Public Library of Science) [11] використовує систему Lens, яка за допомогою штучного інтелекту рекомендує рецензентів та редакторів для наукових статей. Під час подання статті, Lens аналізує її зміст за допомогою методів обробки природної мови. Він фокусується на ключових словах, термінах та загальній тематиці дослідження. Використовуючи свою базу даних вчених та редакторів, Lens шукає людей, які мають відповідну компетенцію та досвід роботи у сфері, що стосується даного дослідження. На основі свого аналізу, Lens генерує список потенційних рецензентів та редакторів, які, ймовірно, володіють необхідними знаннями для оцінки рукопису.

Однією з основних проблем у сфері наукових метрик є складність обробки та аналізу великої кількості даних. Машинне навчання дозволяє автоматизувати цей процес, шляхом створення моделей, які швидко та ефективно аналізують великі обсяги даних, виявляють закономірності та тренди.

Машинне навчання допомагає вдосконалити процеси ранжування та оцінки наукових публікацій та авторів. Алгоритми машинного навчання враховують більш широкий спектр параметрів та факторів, які впливають на наукометричні показники, що дозволяє отримати більш об'єктивні результати. Також ця технологія використовується для покращення якості та точності баз даних, зокрема шляхом автоматичного виявлення та корекції помилок у даних, виявлення дублікатів та підвищення їхньої цінності для наукової спільноти.

Одним з прикладів використання машинного навчання є Scopus [13], який використовує МН для категоризації публікацій, виявлення фальсифікацій та персоналізації оцінок наукової продуктивності. Ще одним з прикладів використання машинного навчання є Web of Science [1] для видобутку даних з наукових публікацій та створення баз даних. Google Scholar [9] використовує машинне навчання для ранжування результатів пошуку та рекомендування релевантних статей.

Одним із перспективних напрямів у цій сфері є використання систем підтримки прийняття рішень (СППР) для класифікації публікацій. Дослідження в працях [15, 14] демонструють, що використання СППР дозволяє не лише автоматично сортувати наукові статті за певними критеріями, а й аналізувати їх вплив на відповідні галузі науки. Використання СППР у поєднанні з методами машинного навчання дозволяє підвищити точність класифікації, автоматично визначати взаємозв'язки між публікаціями та прогнозувати потенційний науковий вплив окремих робіт.

Алгоритм СППР для класифікації наукових публікацій включає кілька ключових етапів: збір та підготовку даних, їх текстову обробку, застосування алгоритмів машинного навчання та ухвалення рішень на основі отриманих результатів.

Класифікація наукових статей може бути реалізована за допомогою байєсівського підходу або нейромережових моделей:

$$C(d) = \arg \max P(c|d) = \frac{P(d|c)P(c)}{P(d)},$$

де $C(d)$ – це клас, до якого найімовірніше належить документ d ; $P(c|d)$ – апостеріорна ймовірність того, що документ належить до класу c ; $P(d|c)$ – ймовірність спостереження документа d , якщо відома, що він належить до класу c ; $P(c)$ – апіорна ймовірність класу c ; $P(d)$ – загальна ймовірність документа, яка є сталою величиною для всіх класів і використовується як нормалізуючий множник.

У формалізації процесу класифікації наукових публікацій використовується оператор $\arg \max$, який дозволяє визначити клас c , для якого апостеріорна ймовірність $P(c|d)$ є максимальною. Це позначення означає вибір такого класу, при якому функція досягає свого максимуму. У даному випадку мова йде про вибір такого класу, який найбільш ймовірно відповідає змісту документа d .

Даний підхід дозволить підвищити точність класифікації, що сприяє ефективному впорядкуванню наукових матеріалів у наукометричних базах даних. Впровадження таких підходів забезпечує оптимізацію інформаційного пошуку та покращення наукових комунікацій.

Використання МН в управлінні науковими публікаціями має ряд переваг, але також несе з собою ряд викликів та обмежень. Один з основних викликів – це якість даних. Моделі машинного навчання вимагають великої кількості якісних даних для ефективної роботи. Однак, якість наукових публікацій і їх метаданих нерівномірні, що впливає на результати аналізу та прийняття рішень.

Ще одним важливим викликом є інтерпретація результатів. Моделі машинного навчання можуть бути складними, і людині їх рішення може бути важко зрозуміти, що ускладнює процес прийняття рішень на основі аналізу даних. Також важливо враховувати етичні аспекти застосування машинного навчання в управлінні науковими публікаціями. Наприклад, необхідність забезпечення конфіденційності та захисту персональних даних авторів і користувачів.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Інноваційні технології, зокрема штучний інтелект і машинне навчання, стають важливими інструментами в системах управління науковими публікаціями, особливо в контексті наукометричних систем та баз даних. Переваги використання штучного інтелекту і машинного навчання в системах управління науковими публікаціями полягають у здатності автоматизувати процеси аналізу та управління даними, швидко виявляти закономірності та тренди у великих обсягах інформації, а також удосконалювати процеси ранжування та оцінки якості наукових джерел. Крім того, вони дозволяють підвищити ефективність роботи науковців та забезпечити швидкий доступ до актуальних даних.

Проте, використання цих технологій також супроводжується викликами та обмеженнями. Один з основних викликів – це необхідність якісних даних для ефективної роботи моделей. Також важливо враховувати складність інтерпретації результатів та етичні аспекти застосування штучного інтелекту і машинного навчання. Відзначимо, що інноваційні технології, зокрема штучний інтелект і машинне навчання, мають великий потенціал для вдосконалення систем управління науковими публікаціями. Проте для успішного використання цих технологій необхідно вирішувати виклики та обмеження.

Список використаних джерел:

1. Колесніков А. П., Карапетян О. М. Штучний інтелект: переваги та загрози використання. *Ефективна економіка*. 2023. № 8. С. 1–13. DOI: 10.32702/2307-2105.2023.8.9.
2. Луніна К. І., Загоруйко І. В. Наукометричні бази даних. Репозиторій ХНЕУ імені С. Кузнеця. Харків, 2021. URL: <http://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/25875>.
3. Мінтій І. С., Іванова С. М. Огляд наукометричних баз Google Scholar та ORCID. Звітна науково-практична конференція Інституту інформаційних технологій і засобів навчання НАПН України / ІІТЗН НАПН. Київ, 2021. С. 63–66. DOI: 10.31812/123456789/5085.
4. Мриглад О. І., Назаровець С. А. Наукометрія та управління науковою діяльністю: вкотре про світове та українське. *Вісник НАН України*. 2019. № 9. С. 81–94. DOI: 10.15407/visn2019.09.081.
5. Назаровець С. А. Бази даних цитувань та пошукові інструменти для науковців майбутнього. *Світогляд*. 2021. № 16. С. 35–38. URL: <http://eprints.rclis.org/41839/1/svit-1-2021-nazarovets-11.pdf>.
6. Штучний інтелект. Машинне навчання / Григоров О. В. та ін. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2019. № 5. С. 17–27. DOI: 10.30977/VEIT.2019.15.0.17.
7. Ярошенко О. Наукометрія. Електронний архів Національного університету «Києво-Могилянська академія». 2020. URL: <https://ekmair.ukma.edu.ua/handle/123456789/18929>.
8. Clarivate. URL: <https://clarivate.com/>.
9. Google Scholar. URL: <https://scholar.google.com/>.
10. Kharlamova G., Stavytskyi A. The Use of Artificial Intelligence in Academic Publishing: Preliminary Remarks and Perspectives. *Access to Justice in Eastern Europe*. 2023. № 21. С. 1–12. DOI: 10.33327/AJEE-18-6.3-n000319.
11. PLOS. URL: <https://plos.org/>.
12. Scientists are publishing too many papers—and that's bad for science. ScienceAdvisor. 2023. URL: <https://www.science.org/content/article/scienceadviser-scientists-are-publishing-too-many-papers-and-s-bad-science>.
13. Scopus. URL: <https://www.scopus.com/>.
14. Shelehov, I., Dovbysh, A., Olefirenko D. Optimization of control tolerances for recognition features in information extremal methods of automatic classification. The IX International Scientific and Practical Conference «Research of young scientists: from idea generation to project implementation»: 2024. С. 228–235.
15. Shelehov I., Prylepa D., Khibovska Y., Otroshchenko M. Machine learning decision support systems for adaptation of educational content to the labor market requirements. *Radio electronics computer science control*. 2023. 1. С. 62–72. DOI: 10.15588/1607-3274-2023-1-6.

УДК 004.912:004.032.26

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.20>**Дмитро ПАВЛЮК**

аспірант, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, pavliuk_d@365.dnu.edu.ua

ORCID: 0009-0003-6670-6022

Олег БАЙБУЗ

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інженерії програмного забезпечення та інформаційних технологій,

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, baibuz_o@365.dnu.edu.ua

ORCID: 0000-0001-7489-6952

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ АВТОМАТИЗОВАНОГО АНАЛІЗУ ТОНАЛЬНОСТІ ТЕКСТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ СУЧАСНИХ ВЕЛИКИХ МОВНИХ МОДЕЛЕЙ

Анотація. Мета дослідження. У статті досліджено можливості автоматизованого аналізу політичних коментарів з використанням сучасних великих мовних моделей (LLM). Метою є розробка програмного рішення, яке класифікує текстові коментарі на два рівні: за емоційним забарвленням (позитивне, негативне, нейтральне) та за цільовим об'єктом реакції (подія, автор, стиль публікації, аудиторія). Оцінено ефективність застосування LLM для аналізу тональності політичних коментарів на основі даних з Telegram-каналів.

Методологія. Для досягнення мети було розроблено програмний прототип, який здійснює автоматичний аналіз текстів. Прототип використовує два виміри класифікації: емоційний тон і цільовий об'єкт реакції, з урахуванням специфіки політичного контексту. Вхідні дані представляють собою текстові публікації з Telegram-каналів та відповідні користувацькі коментарі, а результати класифікації відбувається за допомогою LLM з використанням підходу few-shot learning.

Наукова новизна. Розроблений прототип дозволяє здійснювати багатовимірну класифікацію текстів, що є нестандартним підходом у дослідженні політичного дискурсу, де важливо не лише визначити загальну тональність коментаря, а й з'ясувати, до кого чи до чого направлена реакція. Дослідження також пропонує стратегії покращення результатів класифікації, включаючи інтеграцію динамічних інструкцій та локалізацію навчання на україномовних даних, що може бути важливим кроком для підвищення ефективності використання LLM для політичного контенту в Україні.

Висновки. Результати дослідження показали, що LLM мають значний потенціал для виконання багатовимірної класифікації політичних коментарів, однак виявлено і обмеження, зокрема у виявленні сарказму та іронії, а також у роботі з локальними специфічними контекстами. Запропоновані стратегії покращення, такі як адаптація моделі до україномовних даних та використання динамічних підказок, дозволяють підвищити точність результатів. Дослідження підкреслює необхідність адаптації LLM до політичного контексту, зокрема для модерації контенту та соціологічних досліджень. У подальших дослідженнях необхідно зібрати більші та більш збалансовані датасети для більш релевантних та узагальнених результатів роботи розробленого програмного забезпечення.

Ключові слова: Класифікація тексту, великі мовні моделі (LLM), аналіз тональності, prompt engineering, Telegram API, user bot, автоматизація модерації, веб-розробка, few-shot learning.

Dmytro PAVLIUK, Oleh BAIBUZ. EXPLORING THE CAPABILITIES OF AUTOMATED TEXT SENTIMENT ANALYSIS USING MODERN LARGE LANGUAGE MODELS

Abstract. The objective of the study. This article explores the possibilities of automated analysis of political comments using modern large language models (LLM). The aim is to develop a software solution that classifies textual comments into two levels: by emotional tone (positive, negative, neutral) and by the target object of the reaction (event, author, publication style, community). The effectiveness of using LLM for sentiment analysis of political comments based on data from Telegram channels is evaluated.

Methodology. To achieve the goal, a software prototype was developed that performs automatic text analysis. The prototype uses two classification dimensions: emotional tone and target object of reaction, taking into account the specifics of the political context. The input data consists of textual posts from Telegram channels and corresponding user comments, and the classification results are achieved using LLM with a few-shot learning approach.

Scientific novelty. The developed prototype allows for multidimensional classification of texts, which is an uncommon approach in the study of political discourse, where it is important not only to determine the overall tone of the comment but also to identify who or what the reaction is directed towards. The research also offers strategies to improve classification results, including the integration of dynamic instructions and localization of training on Ukrainian-language data, which could be an important step in enhancing the effectiveness of using LLM for political content in Ukraine.

Conclusions. The results of the research showed that LLMs have significant potential for performing multidimensional classification of political comments. However, limitations were identified, particularly in detecting sarcasm and irony, as well as in working with local specific contexts. Proposed improvement strategies, such as adapting the model to Ukrainian-language data and using dynamic prompts, allow for improved accuracy of results. The research highlights the need to adapt LLMs to the political context, especially for content moderation and sociological research. Future research should focus on collecting larger and more balanced datasets for more relevant and generalized results in the operation of the developed software.

Key words: Text classification, large language models (LLM), sentiment analysis, prompt engineering, Telegram API, user bot, automation of moderation, web development, few-shot learning.

Постановка проблеми. Сучасні інструменти аналізу тональності пропонують різні способи класифікації текстів, включаючи визначення емоційного забарвлення, виявлення токсичності або навіть ідентифікацію конкретних тем. Однак у контексті політичних дискусій у Telegram часто виникає потреба в більш деталізованому розумінні коментарів, яке виходить за межі загального позитиву/негативу. Наприклад, навіть якщо система точно визначає, що коментар має «негативний» тон, вона рідко вказує, що саме викликало таку реакцію: подія, автор публікації, стиль викладу чи інші фактори.

Для певних ситуацій, таких як аналіз політичної комунікації або модерація контенту, може бути корисним додатковий рівень деталізації. Без розрізнення нюансів аналітики, модератори або дослідники можуть втрачати важливі деталі. Наприклад, неможливість автоматично відокремити критику події від критики автора ускладнює:

- Роботу PR-фахівців, які мають реагувати на конкретні проблеми,
- Моніторинг суспільної довіри до окремих інституцій або осіб,
- Вивчення мовних патернів, пов'язаних із пропагандою чи маніпуляціями.

Тому актуальним залишається питання, чи можна доповнити існуючі підходи класифікації, додавши можливість визначати цільові об'єкти реакцій (подія, автор, публікація, аудиторія). Це дозволило б отримувати більш структуровані дані без радикальної зміни поточних рішень, а лише розширюючи їхні можливості для специфічних задач.

Мета дослідження. Розробити та протестувати прототип програмного рішення для аналізу політичних коментарів, яке автоматично завантажує тексти, класифікує їх за допомогою великих мовних моделей (LLM) на два рівні: емоційне забарвлення (позитивне, негативне, нейтральне) та цільовий об'єкт реакції (подія, автор публікації, стиль матеріалу, аудиторія), а також оцінити ефективність LLM у цьому контексті. Додаток має перевірити, чи здатні сучасні моделі точно ідентифікувати складні взаємодії в тексті, такі як одночасне схвалення однієї сутності та критику іншої, враховуючи політичну специфіку, культурні відсилки та ризики помилкового тлумачення (сарказм, іронія). Важливо визначити межі застосування LLM для багатовимірної класифікації та які методи (наприклад, динамічні підказки, few-shot приклади) найкраще підходять для політичного контенту українською/російською мовами. Результати дозволять зрозуміти, чи можна масштабувати подібні рішення для аналізу великих масивів даних без втрати якості, і чи економічно доцільно це з точки зору витрат на обчислювальні ресурси.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні роки відзначені активним дослідженням можливостей великих мовних моделей (LLM) у сфері аналізу тональності, зокрема в політичному контексті. Наприклад, робота «How to Train Your Stochastic Parrot: Large Language Models for Political Text» (2024) демонструє, що GPT-4 у режимі few-shot досягає к-узгодженості ≈ 0.72 з експертами-людьми при класифікації саркастичних твітів про рішення Верховного суду США [10]. Це свідчить про здатність LLM враховувати контекст і політичні реалії, однак автори зазначають, що точність різко падає без явного вказівки фону події в підказці.

Дослідження «Evaluating Large Language Models Against Human Annotators in Latent Content Analysis: Sentiment, Political Leaning, Emotional Intensity, and Sarcasm» (2025) порівнює 7 сучасних LLM (включаючи GPT-4, Gemini, LLaMA-2) з групою з 33 анотаторів у задачах визначення тональності, політичних уподобань та сарказму [3]. Результати показують, що моделі перевершують людей у стабільності оцінок (наприклад, однакові відповіді на однакові запити через час), але відстають у розпізнаванні іронії, особливо в кроскультурному контексті. Це підкреслює важливість локалізації підходів для конкретних мовних середовищ, як-от український сегмент Telegram.

У контексті політичного дискурсу, робота «Sentiment analysis using unsupervised learning for local government elections in South Africa» досліджує можливість аналізу сентименту та класифікацію користувачів як справжніх або ботів. Дослідження висвітлює практичні аспекти та обмеження при аналізі тональності твітів у локальному контексті (реакції на вибори у Південній Африці у Twitter/X) та обмеження та потенційні виклики при використанні unsupervised learning (наприклад, потенційні труднощі зі збалансованістю класів датасета та його актуальність) [6].

Важливий внесок у вивчення сарказму робить робота Gole et al. (2023), де fine-tuning GPT-3 на датасеті SARC 2.0 підвищив точність виявлення іронії до 81% (порівняно з 70% у zero-shot GPT-4) [5]. Автори наголошують, що навіть невеликі спеціалізовані датасети значно покращують якість класифікації, що актуально для аналізу політичних коментарів зі специфічними мемами чи референсами.

Викладення основного матеріалу дослідження. Джерело отримання даних. Перед тим як приступити до роботи необхідно визначити найбільш релевантну онлайн-платформу звідки будуть братися данні у контексті політичного дискурсу. Основні критеріями для вибору платформи були: охоплення аудиторії, характер публікацій та технічна можливість автоматизованого отримання даних. За результатами опитування Київського міжнародного інституту соціології (вересень 2023 року) найбільша кількість

респондентів (44%) отримують інформацію з новинних Telegram-каналів [1]. Крім того, значна кількість публікацій у текстовому вигляді та наявність інструментів для автоматизованого завантаження даних (TDlib, WTelegramClient та інші) робить платформу релевантною у контексті дослідження [2, 11, 12].

Архітектура та розробка програмного забезпечення. Програмне забезпечення було розроблено з використанням мови програмування C# та веб-фреймворку ASP.NET Core. Розроблений додаток складається з трьох сервісів:

- TelegramService: відповідає за отримання необхідних даних з Telegram;
- GptService: аналіз отриманих даних;
- TelegramAnalysisService: звертається до двох інших сервісів та агрегує отримані дані.

Логіка отримання даних. Важливо окреслити, що дані отримуються за допомогою User Bot акаунту Telegram: додаток надає можливість використовувати користувацький обліковий запис для доступу до Telegram API. При розробці TelegramService було використано nuget-пакет WTelegramClient. Сервіс включає у себе три основні компоненти:

- Спільна бібліотека TelegramSessionManagement;
- Web API додаток TelegramService;
- Консольний додаток TelegramHelper;

Спільна бібліотека TelegramSessionManagement включає логіку роботи з сесією WTelegramClient. Доступні наступні методи для ініціалізації клієнта User Bot:

CreateUserBotClientAsync(UserBotClientConfig clientConfig):

Створює новий екземпляр Client на основі переданої конфігурації, забезпечує існування папки для сесій та зберігає дані користувацької сесії та файлу конфігурації у файлову систему.

Параметр clientConfig типу UserBotClientConfig представляє собою об'єкт що зберігає дані необхідні для ініціалізації User Bot клієнта:

- ApiId: ідентифікатор API, який використовується для автентифікації.
- ApiHash: хеш API, який також використовується для автентифікації.
- PhoneNumber: номер телефону, прив'язаний до облікового запису Telegram.
- SessionPath: шлях до файлу, який використовується для збереження стану сесії.

CreateUserBotClientAsync()

Повертає існуючий екземпляр Client або завантажує його з файлу, якщо він ще не створений. При використанні цього очікується, що конфігурація в попередню вже була збережена у файл.

Консольний додаток TelegramHelper використовується для авторизації User Bot клієнта, що використовує TelegramSessionManagement та WTelegramClient.

Додаток визначає такі консольні команди:

Команда login

Ця команда використовується для ініціалізації сесії у додатку Telegram. Також може бути використана для підключення до існуючої сесії, якщо вона вже була ініційована. Вона має наступні параметри:

- -i, --api_id (обов'язковий): ідентифікатор (api_id) Telegram API;
- -h, --api_hash (обов'язковий): хеш (api_hash) Telegram API;
- -p, --phone_number (обов'язковий): номер телефону Telegram API.

Команда connect

Ця команда використовується для підключення до поточної сесії Userbot. Вона не має параметрів.

Команда logout

Ця команда використовується для виходу з сесії Telegram.

Вона має наступні параметри:

- -i, --api_id (обов'язковий): ідентифікатор (api_id) Telegram API;
- -h, --api_hash (обов'язковий): хеш (api_hash) Telegram API;
- -p, --phone_number (обов'язковий): номер телефону Telegram API.

Веб-сервіс TelegramService представляє Web API для отримання даних з Telegram. Він містить один HTTP метод: GetPostWithReplies. Цей метод обробляє HTTP GET запити за маршрутом *api/telegram/postWithReplies*. Він приймає певний набір параметрів і повертає об'єкт PostWithReplies.

Параметри HTTP-запиту:

- ChannelName (обов'язковий): назва каналу в Telegram, з якого потрібно отримати публікацію;
- PublicationId (обов'язковий): ідентифікатор публікації, яку потрібно отримати;
- LoadRepliesOnComments (необов'язковий; за замовчування має значення false/0): прапорець, що вказує, чи потрібно завантажувати відповіді на коментарі інших користувачів. У контексті дослідження використовується значення false/0. Прапорець є важливим елементом препроцесингу вхідних даних, що дозволяє відфільтрувати коментарі у відповідь на інші коментарі як нерелевантні дані.

Після отримання відповіді у вигляді об'єкта *PostWithReplies*, метод повертає HTTP статус 200 (OK) разом з цим об'єктом. Якщо запит не авторизований, повертається статус 401 (Unauthorized).

Формат отримуваних даних (*PostWithReplies*):

- ChannelId (обов'язковий): ідентифікатор каналу в Telegram, з якого отримана публікація;
- PostId (обов'язковий): ідентифікатор публікації;
- PostText: текст публікації (необов'язковий);
- UsersReplies: список відповідей користувачів на публікацію (необов'язковий).

UserReplies представляє відповіді користувача і містить наступні властивості:

- UserId (обов'язковий): ідентифікатор користувача, який залишив відповіді;
- Replies (обов'язковий): список відповідей користувача.

Reply представляє окрему відповідь і містить наступні властивості:

- MessageId (обов'язковий): ідентифікатор повідомлення;
- Message (обов'язковий): текст повідомлення.

Сервіс аналізу тональності. GptService – це Web API сервіс відповідальний за комунікацію з Open AI Web API, визначення формату результатів аналізу та інструкції до LLM. Використовується метод POST за маршрутом */api/gpt/analysisBatch*. Цей метод виконує аналіз відгуків користувачів на публікацію. Він приймає запит, що містить текст публікації, відповіді користувачів, а також список операцій для аналізу. У відповідь повертає об'єкт, який містить результати аналізу для кожного користувача або відповідь зі 401 (не авторизовано) статус-кодом. Параметр: *PostFeedbackAnalysisBatchRequest* (тіло запиту): об'єкт, який містить дані для аналізу. Метод повертає *PublicationSentimentReport*: об'єкт, який містить результати аналізу.

Об'єкт *PostFeedbackAnalysisBatchRequest* представляє структуру запиту, який передається в метод POST */api/gpt/analysisBatch*. Його вміст:

- *PostWithReplies* (обов'язковий): містить текст публікації, відповіді користувачів, ідентифікатор каналу та ідентифікатор публікації;
- *AnalysisOperations* (обов'язковий): список операцій для виконання аналізу.

Складові *PostWithReplies*:

- string? *PostText*: текст публікації;
- List<*UserReplies*> *UsersReplies*: список відповідей користувачів (важливо при цьому уточнити той факт, що аналізуються виключно відповіді на публікацію, а не на повідомлення інших користувачів);
- string *ChannelId*: Ідентифікатор каналу;
- long *PostId*: Ідентифікатор публікації.

Можливі значення *AnalysisOperations*:

- *GetAuthorAttitude*: аналіз ставлення до автора;
- *GetCommunityAttitude*: аналіз ставлення до реакції спільноти;
- *GetPostAttitude*: аналіз ставлення до публікації;
- *GetEventReaction*: аналіз реакції на подію;
- *GetWasPostUnderstood*: аналіз того, чи була публікація зрозуміла;
- *GetEnhancedPublication*: отримання покращеної версії публікації.

Клас *PublicationSentimentReport* представляє структуру відповіді, яка повертається методом POST */api/gpt/analysisBatch*. Його властивості:

- string? *PostText*: текст публікації, який аналізувався;
- List<*UsersRepliesReport*> *UsersRepliesReports*: список звітів про аналіз відповідей користувачів;
- string *ChannelId* (обов'язковий): ідентифікатор каналу, до якого належить публікація;
- long *PostId* (обов'язковий): ідентифікатор публікації;
- *PublicationContext* (обов'язковий): контекст публікації.

Структура *UsersRepliesReport*:

- *UserReplies* *UserReplies* (обов'язковий): відповіді конкретного користувача;
- long *UserId*: ідентифікатор користувача;
- List<*Reply*> *Replies*: список відповідей користувача;
- *ReplySentimentReport?* *SentimentReport*: результати аналізу для відповідей користувача;
- *Attitude?* *AuthorAttitude*: ставлення до автора;
- *Attitude?* *CommunityAttitude*: ставлення до реакції спільноти;
- *Attitude?* *PublicationAttitude*: ставлення до публікації;
- *Attitude?* *EventAttitude*: ставлення до події;
- string? *Reasoning*: обґрунтування аналізу.

У свою чергу Сутність Attitude включає у себе поле Sentiment яке зберігає такі значення:

- Positive,
- Negative,
- Neutral,
- Unknown

Структура PublicationContext:

- string? Context: додаткова інформація про контекст публікації;
- bool WasPublicationUnderstood: чи була публікація зрозуміла.

Бізнес-логіка відповідає за аналіз настроїв (sentiment analysis). Він працює з текстами публікацій, відповідями користувачів і виконує аналіз за допомогою OpenAI API. Основна мета сервісу – обробити текстові дані, виконати запит до великої мовної моделі та повернути структуровані результати. Клас відповідальний аналіз реакції включає два основних методи:

- Метод PerformSentimentAnalysis приймає текст публікації, список коментарів (очікуються коментарі від одного користувача) і список операцій для аналізу. Він формує запит до OpenAI API, отримує відповідь у вигляді JSON і перетворює її в об'єкт ReplySentimentReport. Результат містить інформацію про ставлення до автора, спільноти, публікації, події тощо.

- Метод PerformSentimentAnalysisBatch виконує аналіз настроїв для публікації та всіх відповідей користувачів. Він створює об'єкт PublicationSentimentReport, який містить результати аналізу для кожного користувача, а також контекст публікації. Для кожного користувача викликається окремий запит через згаданий метод PerformSentimentAnalysis. При цьому кожен запит до OpenAI Web API виконується паралельно, задля більш швидкого виконання та запобігання ризику перевищення обсягу контекстного вікна моделі (кожна модель має обмежену кількість вхідних та вихідних токенів на запит).

Відзначимо, що, задля зменшення кількості запитів до моделі та економії токенів, для кожного користувача повертається JSON-об'єкт типу ReplySentimentReport. Для вирішення проблеми ризику повернення некоректної JSON-схеми або неіснуючих значень поля Sentiment (наприклад, "none" замість "unknown") було використано Structured Outputs. OpenAI Structured Outputs – це функція API, яка забезпечує точну відповідність виводу моделі заданій JSON-схемі. Вона дозволяє отримувати структуровані відповіді, що відповідають заданому формату, без необхідності додаткової обробки [9].

У якості моделі для аналізу даних було використано модель GPT o4-mini[8]. Вибір зумовлений в першу чергу поєднанням просунутого обґрунтування та прийнятної вартості для практичного масового застосування [7].

Задля збільшення точності отриманих результатів було використано few-shot підхід (передача кількох прикладів класифікації через інструкцію). На даному етапі не розглядалося використання fine-tuning через потенційно надто широкий контекст дискурсу.

Інструкції до LLM. Для кожного користувача з його набором коментарів формується 3 послідовні інструкції:

1. Системна інструкція, яка загально окреслює спектр задач LLM та визначає логіку побудови вихідного об'єкту (звіту по аналізу тональності);
2. Інструкція з вхідними даними, яка включає текст публікації та коментарі користувача;
3. Набір задач для LLM, який вказує що саме необхідно класифікувати (ставлення до автора, події, публікації, спільноти). Будується динамічно, відштовхуючись від запиту дослідника (перелік значень у полі AnalysisOperations).

Системна інструкція: Your task is a texts classification.

I will provide you a text of the publication and the user's replies on it.

Also, I will provide classification tasks. You have a limited set of available answers: {категорії}. Create an object "report" of the type defined by JSON Schema (Structured Output). Fill out all requested fields. If you can't determine a field, set it to "unknown". For all fields not mentioned – set value to null. Also, fill "report.reasoning" – write a brief reasoning (1-2 sentences per field filled).

Вхідні дані: The publication is the following: {текст публікації}. The user's replies on the publication are the following: {відповіді користувача}.

Приклад задачі класифікації (Ставлення до автора/каналу як автора): How can you classify user's opinion on the author or channel as an author? Is he/it a good publisher or not in user's opinion? You can rely on whether there are any accusations or direct insults against the author/channel.

Негативні приклади: «Один з найгірших новинних каналів»; «Скільки тобі заплатили за цю публікацію?»; «Ти, як завжди, публікуєш сміття»; «адмін клоун»; «провокаційне питання автору».

Позитивні приклади: «база»; «Автор базує»; «респект»; «харош».

Нейтральні приклади: «Це просто жаж!»; «Круто»; «Ось воно як!».

«Насправді, все не так просто: ...».

Assign the answer to the {назва поля} field.

Дані для аналізу. Для аналізу було виконано аналіз таких публічно доступних публікацій у Telegram:

– Міжнародний жіночий день: <https://t.me/novinach/53860>. Включає велику кількість дискусійних коментарів, які як підтримують свято, так ставлять під сумнів його доцільність.

– Зниження попиту на квіти на 8 березня: <https://t.me/novinach/53861>. Публікація подібна до першої, але є більш складною для аналізу: є ризик утотоження LLM зниження попиту на квіти та 8 березня як таким, хоча підтримка зниження попиту на квіти може бути антагоністичною як і навпаки.

Важливо підкреслити наявність різко емоційно забарвленої лексики у багатьох коментарях – це є цінними даними для дослідження. У той же час дослідження не дає оцінку тій чи іншій позиції.

Результати дослідження. *Міжнародний жіночий день*. Додаток продемонстрував кращу точність у прогнозуванні ставлення читачів до автора публікації, спільноти та публікації у порівнянні з класифікацією вказаної події. Вірогідно, це пов'язано з відсутністю необхідності знання додаткового контексту для повного розуміння. У той же час, модель допускала помилки з розпізнаванням сарказму\іронії, особливо у специфічному контексті. Приклад:

Повідомлення: Скориставшись порадою Новинача, вступив у Фрайкор²

Ставлення до автора: unknown

Ставлення до спільноти: unknown

Ставлення до публікації: positive

Ставлення до події: unknown

Даний коментар демонструє негативне ставлення як до публікації, так і до події (загони Фрайкор брали участь у вбивстві Розі Люксембург – людині тісно пов'язаної з Міжнародним жіночим днем [4]). Також, у даному випадку можна помітити залежність трактування ставлення до публікації від ставлення до події у даному випадку некоректного).

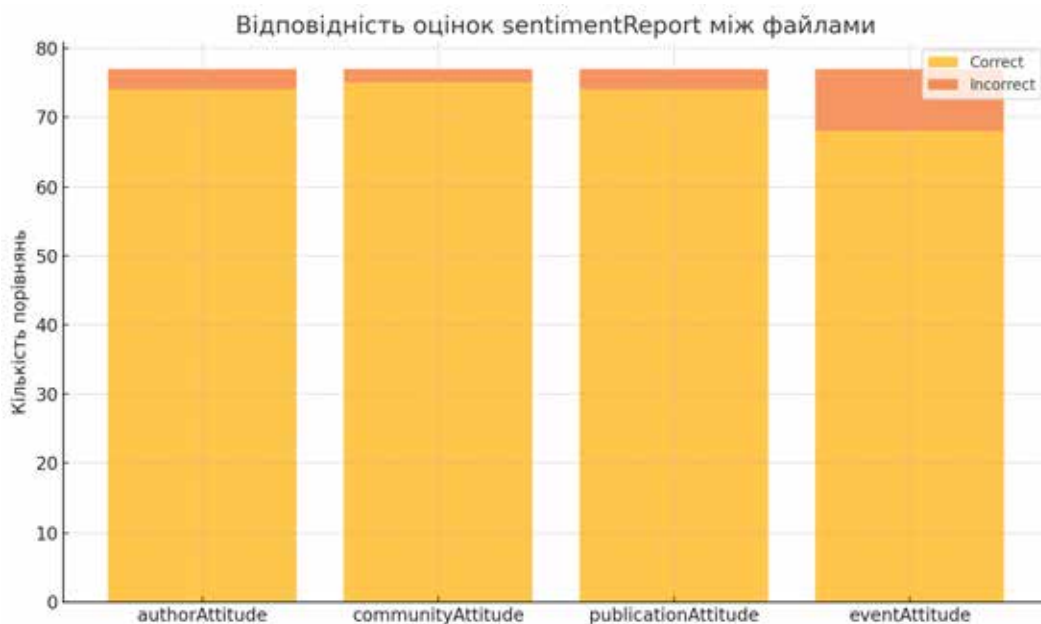


Рис. 1. Результати класифікації коментарів про Міжнародний жіночий день

На Рисунок 1 можемо бачити такі результати:

Ставлення до автора:

- Правильних: 74
- Неправильних: 3

Ставлення до спільноти:

- Правильних: 75
- Неправильних: 2

Ставлення до публікації:

- Правильних: 74

– Неправильних: 3

Ставлення до події:

– Правильних: 68

– Неправильних: 9

Зниження попиту на квіти. У порівнянні з публікацією про Міжнародний жіночий день точність класифікації ставлення до події зменшилася. Приклад:

Повідомлення: А дарма, бо свято має не комуністичне підґрунтя, а боротьбу жінок за права й рівності, коли вони намагалися вибороти право голосувати та гідні умови праці. Не бачу причин не просвяткувати й не привітати суспільно-активних жінок.

Ставлення до автора: unknown

Ставлення до спільноти: unknown

Ставлення до публікації: neutral

Ставлення до події: positive

У публікації йде мова про зниження попиту на квіти, а автор повідомлення демонструє невдоволення цією новиною. Вірогідно, LLM вважає підтримку Міжнародного жіночого дня підтримкою йому присвяченій публікації.

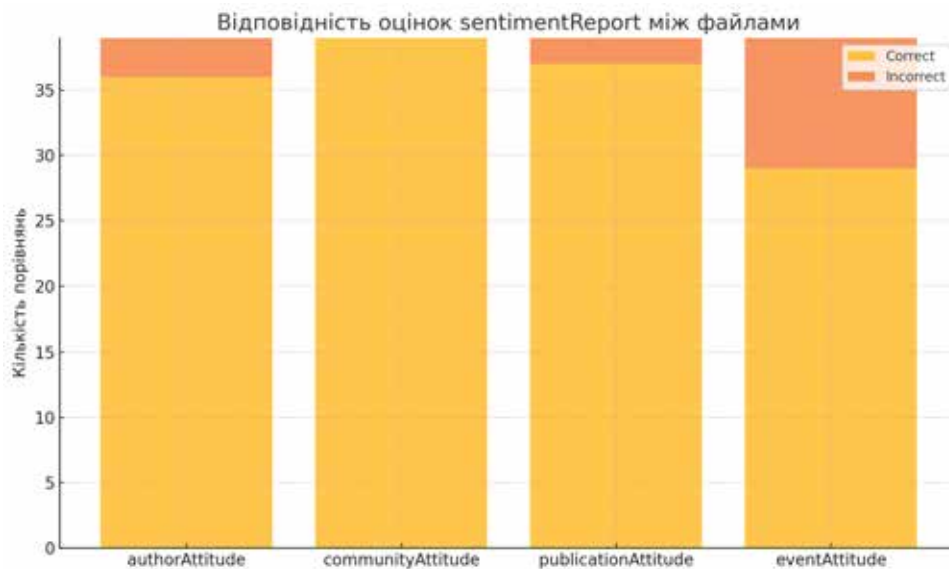


Рис. 2. Результати класифікації коментарів про зниження попиту на квіти

На Рисунку 2 можемо бачити такі результати:

Ставлення до автора:

– Правильних: 36

– Неправильних: 3

Ставлення до спільноти:

– Правильних: 39

– Неправильних: 0

Ставлення до публікації:

– Правильних: 37

– Неправильних: 2

Ставлення до події:

– Правильних: 29

– Неправильних: 10

Важливо зазначити, що у більшості випадків користувачі першочергово реагують на подію та публікацію, а реакція на інформаційний ресурс та на спільноту може бути класифікована як нейтральна або невідома.

Висновки. LLM демонструють потенціал для багатовимірної класифікації, але потребують явного вказівки цільових об'єктів (подія, автор тощо) у підказках задля запобігання підміни різних сутностей, зокрема згаданих подій та задіяних, але не тотожних понять.

Few-shot підходу часто з загальними прикладами часто може бути недостатньо: задля запобігання використання великих датасетів має сенс використовувати локально-специфічні зразки для few-shot класифікації.

Fine-tuning на вузьких датасетах (наприклад, україномовних політичних коментарях) може покращити точність, але потребує додаткових ресурсів. Тема політичного дискурсу досить розлога, тому збір датасетів може бути досить витратним завданням.

Тим не менш, у подальшому дослідженні необхідна робота з більшою кількістю даних та робота над формуванням повноцінного збалансованого датасету. У задіяних даних найчастіше зустрічалися реакції на публікацію та подію, і у той же час реакція на автора публікації\медіа була найчастіше нейтральною\невідомою (хоча, важливо зазначити, що точність класифікації була вищою ніж для публікації та події у зв'язку меншою необхідністю розуміти локальний контекст).

Вірогідно, необхідно також розробити більш чіткий та гнучкий підхід для розрізнення класів «neutral» та «unknown». Модель не завжди схильна до «визнання» того що вона може не знати повний контекст публікації або коментаря до неї. Інакше кажучи, не завжди зрозуміло чи потрібна додаткова підказка, тому що модель може показувати власне бачення неочевидних або вузько спеціалізованих знань.

Недостача специфічних локальних знань LLM вимагає додаткових механізмів корекції (наприклад, балансування підказок або використання динамічних підказок в залежності від контексту).

Таким чином, сучасні LLM підходять для вирішення задач складної класифікації тексту, але необхідно враховувати локальний контекст дослідження та розуміти обмеження моделей. Крім того, для подальшого дослідження необхідна більша кількість даних для більш репрезентативних та узагальнених результатів.

Список використаних джерел:

1. Київський міжнародний інститут соціології. Results of the all-Ukrainian survey for the European Union Advisory Mission in Ukraine. 2023. URL: <https://kiis.com.ua/?lang=ukr&cat=reports&id=1307&page=1> (Дата звернення: 8 листопада 2024).
2. Павлюк Д. І., Байбуз О. Г. Ресурси збору даних для навчання з учителем для прогнозування суспільних настроїв. У: Кісельова О. М., ред. Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (МПЗІС-2024): Тези доповідей XXII Міжнародної науково-практичної конференції. Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара. 2024. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/43697/167315.pdf>
3. Bojic L., Zagovora O., Zelenkauskaitė A., Vukovic V., Cabarkapa M., Veseljević Jerkovic S., Jovančević A. Evaluating large language models against human annotators in latent content analysis: Sentiment, political leaning, emotional intensity, and sarcasm. 2025. URL: <https://doi.org/10.48550/arxiv.2501.02532> (Дата звернення: 23 березня 2025).
4. Feigel L. The Murder of Rosa Luxemburg review – tragedy and farce. The Guardian. 2019. URL: <https://www.theguardian.com/books/2019/jan/09/the-murder-of-rosa-luxemburg-by-klaus-gietinger-review> (Дата звернення: 21 квітня 2025).
5. Gole M., Nwadiugwu W.-P., Miransky A. On sarcasm detection with OpenAI GPT-based models. 2023. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.04642> (Дата звернення: 23 березня 2025).
6. Matloga P., Marivate V., Olaleye K. Sentiment analysis using unsupervised learning for local government elections in South Africa. JeDEM – eJournal of eDemocracy and Open Government. 2025. Vol. 17, No. 1. P. 144–169. DOI: <https://doi.org/10.29379/jedem.v17i1.945> (Дата звернення: 30 березня 2025).
7. OpenAI. API pricing. URL: <https://openai.com/api/pricing/> (Дата звернення: 10 квітня 2025).
8. OpenAI. Introducing OpenAI o3 and o4-mini. 2025. URL: <https://openai.com/index/introducing-o3-and-o4-mini/> (Дата звернення: 10 квітня 2025).
9. OpenAI. Structured outputs. URL: <https://platform.openai.com/docs/guides/structured-outputs> (Дата звернення: 10 квітня 2025).
10. Ornstein J. B., Blasingame A., Truscott J. B. How to Train Your Stochastic Parrot: Large Language Models for Political Texts. 2022. URL: <https://joeornstein.github.io/publications/ornstein-blasingame-truscott.pdf> (Дата звернення: 23 березня 2025).
11. Telegram Messenger Inc. Telegram Database Library (TDLib). URL: <https://core.telegram.org/tldlib> (Дата звернення: 8 листопада 2024).
12. wiz0u. WTelegramClient[Source code]. 2025. URL: <https://github.com/wiz0u/WTelegramClient> (Дата звернення: 30 березня 2025).

УДК 004.93:72

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.21>

Дмитро ПЕТРИНА

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри технічної механіки, інженерної та комп'ютерної графіки, Івано-Франківський
національний технічний університет нафти і газу,
dmytro.petryna@nung.edu.ua
ORCID: 0000-0003-0663-746X

Олена КОРНУТА

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри технічної механіки, інженерної та комп'ютерної графіки, Івано-Франківський
національний технічний університет нафти і газу,
olena.kornuta@nung.edu.ua
ORCID: 0000-0002-0626-888X

Софія МЕЛЬНИК

здобувачка освіти першого (бакалаврського) рівня кафедри архітектури та містобудування, Івано-
Франківський національний технічний університет нафти і газу, sofiia.melnyk-am232@nung.edu.ua
ORCID: 0009-0008-7837-2273

АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ГЕНЕРАТИВНИХ НЕЙРОМЕРЕЖ ДЛЯ ДИЗАЙН-ПРОЄКТІВ

Анотація. У статті досліджуються ключові аспекти використання нейромереж в архітектурному проектуванні та в проектуванні інтер'єрів. Розглянуті переваги генеративно-змагальних мереж в цій галузі. На основі промтів згенеровані різні варіанти зображення шале в горах та його внутрішнього дизайну інтер'єру. Також створені безшовні текстури в нейромережі Midjourney. За допомогою цієї ж нейромережі згенеровано текстуру меблів та постери для 3-D візуалізації квартири у програмі SketchUp.

Метою роботи є комплексне дослідження застосування нейромереж в дизайн-проектах. Для цього необхідно проаналізувати сучасний стан досліджень в цій галузі, визначити основні напрямки розвитку та існуючі проблеми. Описати різноманітні способи використання нейромереж в архітектурі та дизайні інтер'єрів, оцінити потенційні переваги та ризики застосування нейромереж та розробити рекомендації щодо ефективного використання нейромереж в практиці архітектурного проектування та проектування інтер'єрів.

Методологія. В статті використовуються теоретичні методи дослідження літературних джерел, тестування та комплексний аналіз можливостей сучасних нейромереж та емпіричні методи дослідження використання нейромереж для дизайн проектів.

Наукова новизна полягає у адаптації сучасних підходів використання нейромереж до генерації архітектурних проектів та дизайну інтер'єрів.

Висновки. Використання нейромереж у архітектурному проектуванні та дизайні інтер'єрів та екстер'єрів дедалі набуває широкого застосування. Розвиток генеративного створення зображень стрімко розвивається і активно застосовується у цих сферах. Елементи редагування за допомогою штучного інтелекту використовують все більше відомих програм для дизайну і потребують попереднього аналізу та вивчення для створення певних рекомендацій у їх застосуванні. В роботі детально проаналізовані напрямки майбутнього розвитку мереж на базі штучного інтелекту та запропоновані практичні засоби для їх використання.

Ключові слова: штучний інтелект, генеративна нейромережа, архітектурне проектування, дизайн інтер'єрів.

Dmytro PETRYNA, Olena KORNUA, Sofiia MELNYK. ASPECTS OF USING GENERATIVE NEURAL NETWORKS FOR DESIGN PROJECTS

Abstract. This article explores the key aspects of using neural networks in architectural and interior design. The advantages of generative adversarial networks (GANs) in this field are discussed. Based on prompts, various images of a mountain chalet and its interior design were generated. Seamless textures were also created using the Midjourney neural network. Using the same neural network, furniture textures and posters were produced for 3D visualization of an apartment in SketchUp.

This work aims to provide a comprehensive study of neural networks' application in design projects. To achieve this, it is necessary to analyze the current state of research in this field, identify the main development directions, and identify existing issues. The study describes various ways of using neural networks in architecture and interior design, evaluates the potential benefits and risks of their application, and develops recommendations for the effective use of neural networks in architectural and interior design practice.

Methodology. The article uses theoretical methods of literature review, testing, and comprehensive analysis of the capabilities of modern neural networks, as well as empirical methods for studying the use of neural networks in design projects.

Scientific novelty lies in the adaptation of modern approaches to the use of neural networks for the generation of architectural projects and interior design.

Conclusions. The use of neural networks in architectural design as well as in interior and exterior design is becoming increasingly widespread. The development of generative image creation is progressing rapidly and is being actively applied

in these fields. AI-based editing tools are being integrated into more and more well-known design programs and require preliminary analysis and study to develop specific recommendations for their use. This work provides a detailed analysis of future development directions of AI-based networks and proposes practical tools for their implementation.

Key words: artificial intelligence, generative neural network, architectural design, interior design.

Постановка проблеми. Архітектура, як мистецтво і наука про створення будівель, постійно еволюціонує під впливом нових технологій. Одним із найперспективніших напрямків у цій галузі є застосування штучного інтелекту, зокрема нейромереж. Ці потужні інструменти відкривають нові можливості для творчості, аналізу даних та оптимізації процесів проектування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Протягом останніх років спостерігається зростаючий інтерес до використання нейромереж в різних сферах дизайну [4], зокрема в архітектурному [5]. Нейромережі дозволяють генерувати нові ідеї, аналізувати великі обсяги даних про існуючі будівлі та міські середовища, а також автоматизувати рутинні завдання. Також встановлена відповідність нейронних мереж кожному з видів продукції графічного дизайну [6]. Можливості, які пропонує технологія нейромереж, дозволяють оптимізувати робочий процес дизайнерів, заощадити час і кошти [2]. У дослідженні [7] з'ясовано ступінь впливу ШІ на графічний дизайн на прикладі операціоналізації нейромереж, які уможливили генеративну графіку, дозволили використовувати високу варіативність параметрів, також регулювати кольорову гаму, контраст та геометричні пропорції об'єктів, що створюються. Вплив штучного інтелекту на індустрію дизайну, зокрема на наслідки для ролей і кар'єр дизайнерів наведено також у [3]. Отримані результати у дослідженні [9] доводять перспективність штучного інтелекту в реалізації рішень у графічному дизайні, а саме результати генерування «Midjourney» доречні в архітектурі, моделюванні, маркетингу. У [10] порівнюються якісні параметри візуального контенту, створеного на базі штучного інтелекту програмою Midjourney з використанням різних її версій. Автори [8] розробили модель, яка поєднує згорткові нейронні мережі для аналізу візуальних даних та рекурентні нейронні мережі для обробки текстових запитів, що уможливорює комплексно опрацьовувати інформацію і створювати персоналізовані дизайнерські рішення. За допомогою нейромереж у [1] створено загальнодоступний набір даних різноманітних дрібнозернистих текстур для інтер'єрів приміщень.

Однак, незважаючи на значний потенціал, застосування нейромереж в архітектурному дизайні та дизайні інтер'єрів все ще залишається відносно новим і малодослідженим напрямком. Існує багато відкритих питань щодо ефективності різних типів нейромереж, їх інтеграції в існуючі процеси проектування, а також етичних аспектів використання штучного інтелекту в творчій діяльності.

Метою цієї наукової статті є комплексне дослідження застосування нейромереж в дизайн-проектах. Для цього необхідно проаналізувати сучасний стан досліджень в цій галузі, визначити основні напрямки розвитку та існуючі проблеми. Описати різноманітні способи використання нейромереж в архітектурі та дизайні інтер'єрів, оцінити потенційні переваги та ризики застосування нейромереж. Розробити рекомендації щодо ефективного використання нейромереж в практиці архітектурного проектування та проектування інтер'єрів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Тема використання нейромереж в архітектурному дизайні є відносно новою, але вже активно досліджується. Сучасні дослідження свідчать про значний потенціал нейромереж у генерації нових архітектурних форм, оптимізації будівель та створенні персоналізованих житлових просторів.

Ключовими напрямками досліджень на сьогодні є:

- Генеративний дизайн: Нейромережі використовуються для створення нових архітектурних концепцій на основі великих обсягів даних про існуючі будівлі, стилі та матеріали. Дослідники застосовують такі моделі як GANs (Generative Adversarial Networks) для генерації різноманітних архітектурних форм.

- Створення візуалізацій: Нейромережі дозволяють створювати реалістичні візуалізації проектів, що значно покращує комунікацію між архітекторами та замовниками.

При використанні нейромереж існує ряд проблем та викликів, з якими стикаються дизайнери. Основною проблемою для початку формування задачі та створення початкового ескізу з використанням нейромереж є недостатня кількість даних – для ефективного навчання штучного інтелекту потрібні великі обсяги високоякісних даних. Генерування неочікуваних результатів на базі цих даних створює складності у розумінні того, як нейромережа прийняла те чи інше рішення. Також виникають питання щодо авторського права, відповідальності за прийняття рішень та впливу на міське середовище.

Штучний інтелект відкриває нові можливості для дизайнерів та архітекторів, дозволяючи швидко і ефективно генерувати різноманітні варіанти проектів. Існує багато програм, які використовують ШІ для цих цілей. Нові горизонти в архітектурному дизайні відкривають генеративно-змагальні мережі

(GAN), пропонуючи інноваційні підходи до створення будівель та міських середовищ. Наприклад, GAN дозволяють генерувати нові архітектурні стилі та форми, їх можна навчити на великій кількості зображень різних архітектурних стилів, щоб генерувати нові, унікальні стилі. Також GAN можуть створювати нові форми будівель, які не мають аналогів в існуючій архітектурі, можуть генерувати зображення будівель з різноманітними матеріалами та текстурами, що допомагає архітекторам експериментувати з новими матеріалами та комбінаціями. Важливою проблемою є пошук оптимальних рішень для складних архітектурних задач, таких як розміщення вікон, дверей, колон тощо, і GAN можуть допомогти знайти оптимальні рішення. GAN можуть моделювати різні варіанти будівель та аналізувати їх енергоефективність, допомагаючи архітекторам створювати більш екологічні будівлі. Крім того, GAN можуть допомогти оптимізувати планування внутрішніх просторів, враховуючи функціональні та естетичні вимоги.

Важливою є можливість GAN створювати високоякісні, фотореалістичні візуалізації проектів, що дозволяє замовникам краще уявити кінцевий результат, генерувати інтерактивні візуалізації, які дозволяють користувачам досліджувати проект з різних ракурсів, створення динамічних параметричних моделей будівель, які можуть адаптуватися до змінних умов. GAN можуть генерувати велику кількість варіантів дизайну на основі заданих параметрів, що дозволяє архітекторам швидко оцінити різні рішення, можуть створювати проекти, які максимально відповідають індивідуальним потребам і вподобанням клієнтів. При цьому GAN можуть враховувати контекст проекту, такий як місце розташування, клімат, культурні особливості.

Приклади програмного забезпечення таких нейромереж:

StyleGAN: Спеціалізується на генерації високоякісних зображень облич, але може бути адаптований для генерації архітектурних елементів.

Pix2Pix: Використовується для перетворення зображень з одного домену в інший, наприклад, для створення архітектурних візуалізацій на основі фотографій.

Deep Convolutional GAN (DCGAN): Застосовується для генерації зображень високої роздільної здатності, що може бути корисним для створення детальних візуалізацій будівель.

Основною проблемою для аналізу тих чи інших прогам, їх порівняння є те, що всі вони є платними і для отримання адекватного оцінювання необхідно використовувати професійні версії, що є достатньо коштовним.

В даній роботі розглянемо можливість використання онлайн лабораторії **Midjourney** для створення початкової візуальної ідеї певного архітектурного проекту. Midjourney – це потужна нейромережа, яка перетворює текстові описи на деталізовані зображення. Вона працює за принципом генеративного штучного інтелекту, тобто здатна створювати нові, унікальні зображення на основі отриманої інформації. Основною базою для створення зображень є *prompt* – словесне пояснення для майбутнього зображення. При цьому існують додаткові налаштування і функції, які суттєво впливають на остаточний результат і які необхідно врахувати при формуванні задачі

Основні напрямки використання Midjourney в архітектурному дизайні:

Швидка візуалізація ідей: Замість тривалого процесу створення 3D-моделі, архітектор може швидко отримати візуальне представлення своєї ідеї, описавши її текстом. Це дозволяє генерувати безліч варіантів дизайну та обирати найкращий.

Створення концептуальних артоб'єктів: Midjourney здатна генерувати нестандартні та креативні архітектурні рішення, які можуть надихнути архітектора на нові ідеї.

Розроблення презентаційних матеріалів: Якісні зображення, створені за допомогою Midjourney, можуть бути використані для створення ефектних презентацій проектів.

Дослідження різних стилів та епох: Можна експериментувати з різними архітектурними стилями та епохами, генеруючи зображення в стилі модернізму, готики, футуризму тощо.

Важливо розуміти, що Midjourney є інструментом, який допомагає архітектору, але не замінює його. Архітектор все одно повинен мати глибокі знання про архітектуру, будівництво та дизайн, щоб оцінити якість згенерованих зображень та приймати рішення щодо проекту.

При всіх перевагах використання Midjourney, а це – швидкість генерації зображень, креативність та нестандартність рішень, можливість експериментувати з різними стилями, спрощення процесу візуалізації ідей існує ряд обмежень в точності пропорцій та масштабу готових зображень, а також в необхідності багаторазових уточнень для отримання бажаного результату

Основою роботи з Midjourney є текстові описи – промти (*prompt*), які детально описують майбутнє зображення. Промпт – це текстовий опис, який треба надати нейромережі Midjourney, для створення зображення. Промти можуть використовувати загальні фрази, проте для точного відтворення бажані деталізовані та розгорнуті описи всіх бажаних елементів. Описи потрібно вводити іноземною (бажано англійською) мовою.

Задамося розгорнутим промтом для реалізації архітектурного проекту відпочинкового будиночку – шале в горах: «A luxury private chalet nestled in the mountains, showcasing a breathtaking contrast of interplaying light and shadow across its elegant architecture. The chalet's warm, ambient lights glow through large windows, casting soft golden hues that reflect off rich wooden and stone textures. The surrounding mountains are wrapped in a dramatic mix of sunlight and shadows, enhancing the chalet's opulent yet cozy appeal. Crisp mountain air and a peaceful twilight sky add to the serene, high-end atmosphere, creating a perfect retreat in nature».

В перекладі українською мовою: «Розкішне приватне шале, розташоване в горах, демонструє захоплюючий контраст взаємодії світла й тіні в елегантній архітектурі. Тепле навколишнє світло шале світиться крізь великі вікна, відливаючи м'які золотисті відтінки, які відбиваються від багатих дерев'яних і кам'яних текстур. Навколишні гори оповиті драматичною сумішшю сонячного світла та тіней, що підсилює розкішну, але затишну привабливість шале. Чисте гірське повітря та спокійне сутінкове небо додають безтурботної високоякісної атмосфери, створюючи ідеальний відпочинок на природі» (в подальшому будемо використовувати тільки переклад опису). Результат генерації наведено на (рис. 1).

В більшості випадків задаємося налаштуваннями промту такими як стилістика та варіації зміни типу генеративного зображення. Для отримання максимально якісного результату використовуємо останню версію Midjourney V6.1.

При виборі якогось конкретного результату генеративна мережа дозволяє вносити додаткові зміни та редагування, замальовуючи області картинки, які необхідно змінити при цьому вносячи зміни в промт. Також для користувачів з більшою кількістю генерацій та вищим тарифним планом є можливість редагування власних фотографій (рис. 2).



Рис. 1. Варіанти генерації Midjourney для першого промту

Для подальшої генерації використали першу картинку зі змінами прибудинкового ландшафтного дизайну та дещо зменшеним масштабом та отримали наступні зображення (рис. 3).

В подальшому доцільно редагувати і правити якісь конкретні елементи, змінюючи промт і використовуючи панель редагування. Так, в наступних згенерованих зображеннях використовувались зміни в промті, де зазначався змінений дах та зображення в зимовий період (рис. 4).

Відповідні генерації можуть проводитися і для дизайну інтер'єру. Як і в першому варіанті задамося розгорнутим описом для генерації зображень внутрішньої частини шале: «Простора вітальня з дво-рівневою стелею і великим вікном у підлогу в зрубі. Надворі засніжений пейзаж. Вітальня обставлена

пишними сучасними диванами та кріслами нейтральних тонів, згрупованими навколо низького центрального журнального столика. Колірна гамма кімнати складається з світло-бежевих і теплих відтінків, а м'яке освітлення різними лампами створює затишну атмосферу» (рис. 5).

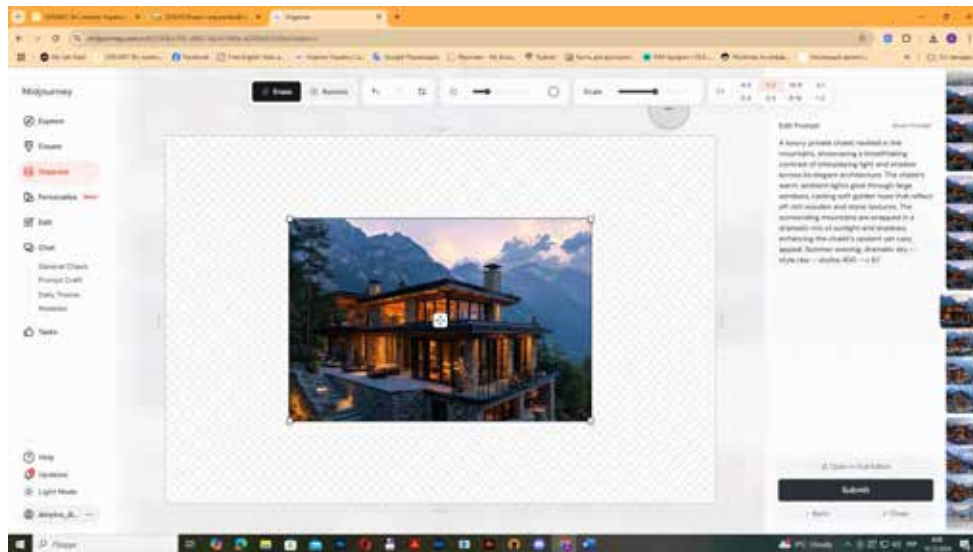


Рис. 2. Панель редагування у Midjourney

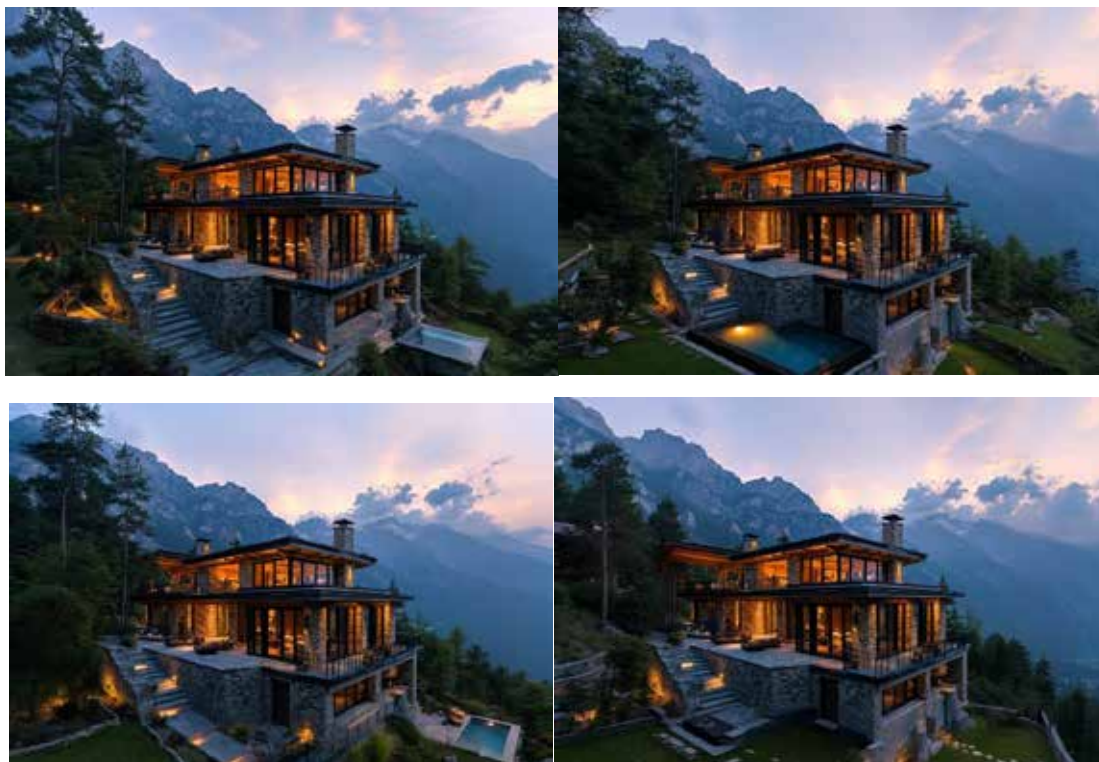


Рис. 3. Варіації зміни ландшафтного дизайну

При виборі третього варіанту вносимо необхідні зміни за допомогою панелі редагування, шляхом видалення елементів, які підлягатимуть повторній генерації (рис. 6).

Повторною генерацією отримали варіанти, наведені на (рис. 7).



Рис. 4. Варіації зміни архітектурних елементів та пори року



Рис. 5. Варіанти генерації внутрішнього дизайну

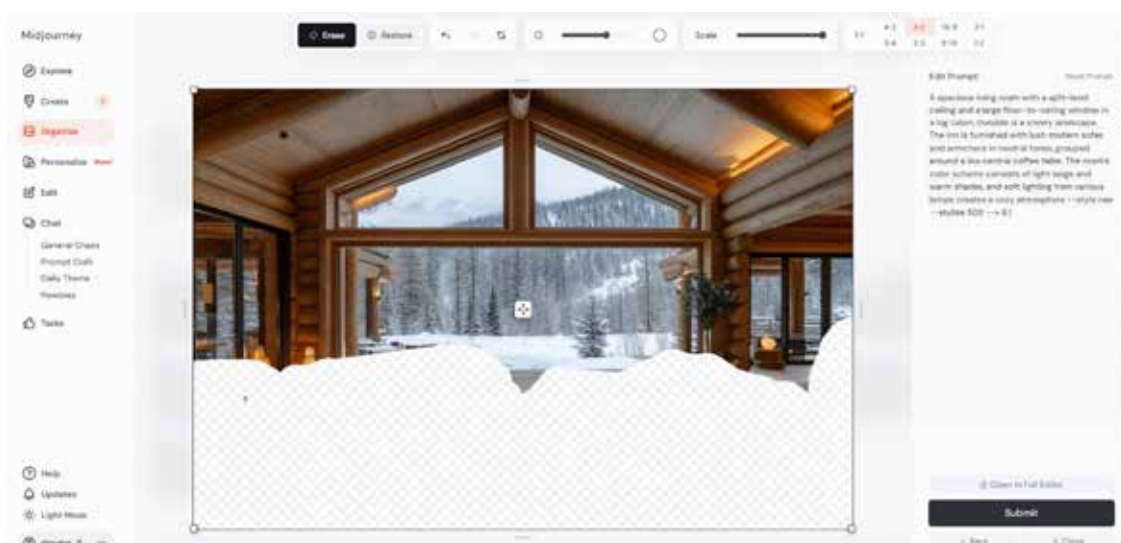


Рис. 6. Видалення елементів для подальшої генерації в інтер'єрі будинку



Рис. 7. Варіації зміни внутрішнього дизайну

Одним з практичних напрямків застосування генеративних зображень у дизайні архітектурних об'єктів є створення текстур та зображень, які можуть бути використані безпосередньо у реальних проєктах. Для прикладу згенеруємо текстуру меблів та постери для 3-D візуалізації квартири у програмі SketchUp (рис. 8).

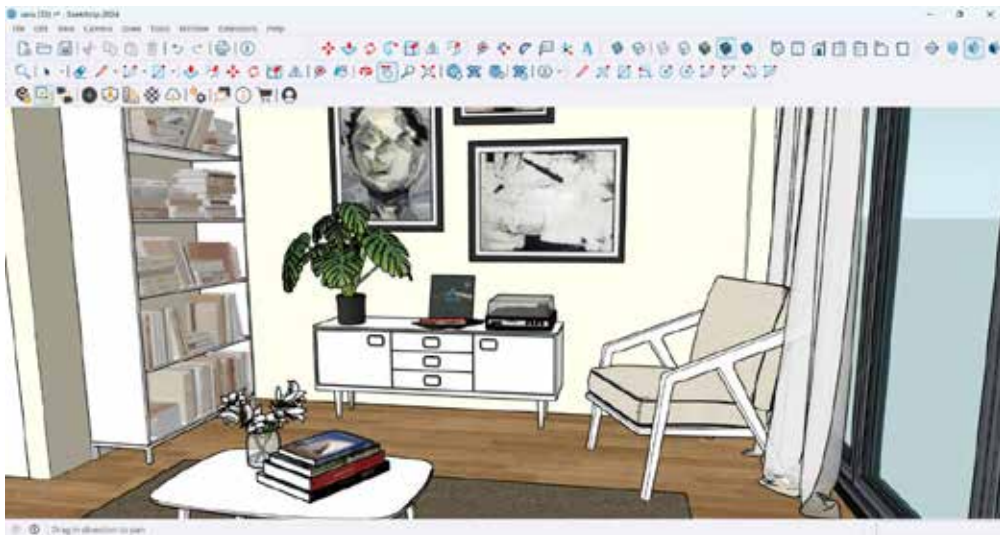


Рис. 8. Початкова візуалізація

Програма Midjourney має можливість створювати безшовні текстури різного спрямування. Для цього в описовому промті необхідно вибрати співвідношення стрін 1:1 та в налаштуванні додати розширення `--tile`. Промт буде мати наступний вигляд «`wooden furniture texture, cherry wood color --tile --stylize 300`». Результат генерації наведений на (рис. 9).

При поєднанні всіх вище вказаних задач отримаємо відповідний результат (рис. 12).



Рис. 9. Згенерована текстура

Також для певної персоналізації проекту створимо оригінальні постери певної вінтажної стилістики (рис. 10, 11).

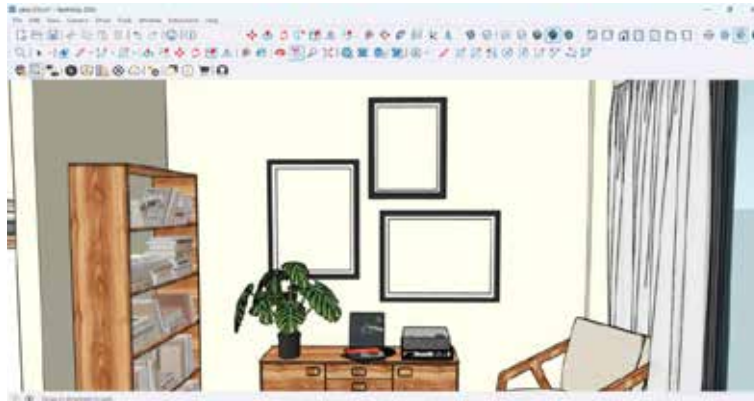


Рис. 10. Місця під постери



Рис. 11. Згенеровані постери для персоналізації подальшої візуалізації кімнати



Рис. 12. Кінцевий варіант моделювання

Висновки. Використання нейромереж у архітектурному проектуванні та дизайні інтер'єрів та екстер'єрів дедалі набуває широкого застосування. Розвиток генеративного створення зображень стрімко розвивається і активно застосовується у цих сферах. Елементи редагування за допомогою штучного інтелекту використовують все більше відомих програм для дизайну і потребують попереднього

аналізу та вивчення для створення певних рекомендацій у їх застосуванні. В роботі детально проаналізовані напрямки майбутнього розвитку мереж на базі штучного інтелекту та запропоновані практичні засоби для їх використання. Слід відмітити, що тотальна інвазія штучного інтелекту не применшує креативної діяльності людини та не може бути замінена. ШІ слід сприймати як невідворотнє майбутнє у сферах проектування і як помічника-асистента для значного пришвидшення відповідної роботи.

Список використаних джерел:

1. Chen J., Shao Z., Cen C. et al. HyNet: A novel hybrid deep learning approach for efficient interior design texture retrieval. *Multimed Tools Appl* 83, 28125–28145 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11042-023-16579-0>
2. Irbite A., Strode, A. Artificial intelligence vs designer: the impact of artificial intelligence on design practice. *Society. Integration. Education. Proceedings of the International Scientific Conference*, 4. 2021. 539–549. <https://doi.org/10.17770/sie2021vol4.6310>
3. Nguyen H. Impact of artificial intelligence in design [Thesis, LAB University of Applied Sciences]. Theseus. 2023. URL: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/804369/Nguyen_Hien.pdf?sequence=2&isAllowed=y
4. Petryna D., Kornuta V., Kornuta O. Using neural network tools to accelerate the development of Web interfaces. *Information Technologies and Computer Engineering*. 2024. 21(2). 42–50. <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2024-60-2-42-50>
5. Бейнер Н. В., Бейнер П. С., Кулік М. В., Іваненко Д. С. НЕЙРОМЕРЕЖІ В АРХІТЕКТУРІ : ВІД ІДЕЇ ДО РЕАЛІЗАЦІЇ. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2024. № 2 (020)
6. Божко Т., Ареф'єв В. Нейронні мережі як інструмент графічного дизайну. *Вісник КНУКіМ. Серія: Мистецтвознавство*. 2023. № 48. С. 125–135. doi:10.31866/2410-1176.48.2023.282475
7. Геренко С. Штучний інтелект у графічному дизайні: кейс генеративних нейромереж. *Деміург: ідеї, технології, перспективи дизайну*. 2024. 7(1), 78–91. <https://doi.org/10.31866/2617-7951.7.1.2024.300924>
8. Крук П., Гончаренко Т. Застосування глибокого навчання для прогнозування й автоматизації просторових рішень у дизайні інтер'єру. *Управління розвитком складних систем*. 2024. (58), 103–109. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.58.103-109>
9. Нейромережа MidJourney як інструмент для генерування дизайн графіки / О. В. Колісник, Р. Д. Михайлова, О. С. Береговий, В. В. Власюк, Д. В. Куровська. *Art and Design*. 2023. № 1 (21). С. 106–115.
10. Петрина Д., Корнута О. Порівняння різних версій додатку MIDJOURNEY та його використання в різних сферах створення візуального контенту. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2024. Том 333 № 2. с. 212–217. DOI 10.31891/2307-5732-2024-333-2-34

УДК 519.681.2

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.22>

Олексій ПІСКУНОВ

кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри прикладної математики, Державний університет «Київський авіаційний інститут», oleksii.piskunov@npp.nau.edu.ua
ORCID: 0000-0002-9200-3422

Наталя ТУПКО

кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри прикладної математики, Державний університет «Київський авіаційний інститут», natalia.tupko@npp.nau.edu.ua
ORCID: 0000-0003-0625-3271

Олександр ВАСИЛЬЄВ

кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри оптимального керування і економічної кібернетики, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, av5111955@gmail.com
ORCID: 0000-0002-3826-4883

Надія ТОПІХА

здобувач магістратури кафедри прикладної математики, Державний університет «Київський авіаційний інститут», 6856645@stud.nau.edu.ua
ORCID: 0009-0005-1654-7179

ФОРМАЛЬНЕ ТЕСТУВАННЯ ФУНКЦІЙ ДІЙСНОГО АРГУМЕНТУ

Анотація. У статті розглянуто алгебраїчний підхід до проектування та тестування програмного забезпечення. **Метою статті** є застосування методів формального проектування програмного забезпечення (ПЗ) на прикладі розробки функцій підрахунку довжини дуги меридіану. Методи формальної розробки ПЗ досі не набули широкого використання в практичній діяльності, але враховуючи формальну природу мов програмування, їх впровадження в математичні дослідження виглядає цілком обґрунтованим.

Методи дослідження: під час дослідження використовуються базові положення методу формальної розробки RAISE, які дозволяють застосовувати формальну логіку. Зокрема, розглядається використання інструментів розробки програмного забезпечення від RAISE Method Group для специфікації функцій обчислення довжини дуги меридіана та визначення умов створення драйвера тестів для цих функцій на ранньому етапі програмування. Специфікація умов для тестування формулюється у вигляді аксіом з використанням абстрактного аплікативного підходу.

Наукова новизна дослідження полягає в тому, що мова формальних специфікацій RAISE Specification Language (RSL) та спеціалізована утиліта є достатньо зручними інструментами для повсякденної роботи маленьких груп наукових співробітників, які не мають спеціальних навичок в галузі формальної розробки ПЗ. Особливо цікавила область математичних досліджень, зокрема для розробки складних функцій дійсного аргументу. Окрім основної мети, було уточнено сім коефіцієнтів (C0, C2, C4, C6, D2, D4, D6) розкладання розглянутих функцій у ряд Маклорена, складено формули та виконано розрахунки для наступних двох коефіцієнтів (C8, D8). Запропоновано практичний прийом розробки узагальнених драйверів тесту, заснований на успадкуванні класу, що розробляється від муляжу (mock class) з використанням можливостей .NET, таких як класи, що розділяються (partial class). Загалом стаття спрямована на зменшення розриву між теоретичними перевагами методів формальної розробки та їх недостатньо широкого застосуванням у практиці.

Висновки: алгебраїчне проектування та тестування базується на математичних принципах, що дозволяє: уникати двозначності і неоднозначності в описі функціональності; забезпечувати точність та однозначність у формулюванні вимог до програми; автоматизувати процес генерації тестових випадків та перевірки роботи, відповідно підвищувати надійність; виявляти і усувати помилки ще на стадії розробки та прискорити розробку ПЗ.

Ключові слова: алгебраїчне проектування тестів, RAISE Specification Language, функція дійсного аргументу.

Oleksii PISKUNOV, Natalia TUPKO, Alexander VASILIEV, Nadiia TOPIKHA. FORMAL TESTING OF REAL-VALUED FUNCTIONS

Abstract. The article discusses the algebraic approach to software design and testing.

The aim of the study is to apply methods of formal software design to the development of functions for calculating the length of a meridian arc. Although formal software development methods have not yet been widely adopted in practical activities, their application in mathematical research seems reasonable due to the formal nature of programming languages.

Research methods: the research utilizes the basic principles of the RAISE formal development method, which allows the use of formal logic. Specifically, the study explores the use of software development tools provided by the RAISE Method Group to specify functions for calculating the length of a meridian arc and to define conditions for creating a test driver for these functions at an early programming stage. The testing conditions are specified in the form of axioms using the abstract applicative approach.

Scientific novelty the novelty of the study lies in demonstrating that the RAISE Specification Language (RSL) and specialized utilities are sufficiently convenient tools for small research teams that lack specialized skills in formal software development. The focus is on mathematical research, particularly on developing complex real-valued functions. In addition to the primary goal, seven coefficients ($C_0, C_2, C_4, C_6, D_2, D_4, D_6$) of the Maclaurin series expansion for the considered functions were clarified. Formulas and calculations for the next two coefficients (C_8, D_8) were also performed. A practical method for developing generalized test drivers based on inheriting a class from a mock class was proposed, utilizing .NET features such as partial classes. Overall, the article aims to reduce the gap between the theoretical advantages of formal development methods and their insufficient practical application.

Conclusions: algebraic design and testing are based on mathematical principles, enabling the following: avoiding ambiguity in functionality descriptions; ensuring precision and clarity in software requirements formulation; automating the generation of test cases and verification processes, thereby enhancing reliability; identifying and fixing errors at the development stage; and accelerating software development.

Key words: algebraic test design, RAISE Specification Language, real-valued function.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі вирішується задача застосування методів формального тестування в практиці програмування, а саме пропонуються засоби формулювання умов для створення димових тестів для функцій дійсного аргументу на прикладі обчислення довжини дуги меридіана.

Зазначимо, що цей підхід використовувався в роботах і методах розробки програмного забезпечення багатьох авторів. Зокрема, у Б. Мейера в проектуванні за контрактом [1], у методі формальної розробки RAISE [2], у статті щодо формалізації принципу підстановки Б. Лісков [3], у видатній монографії Коді-Вейта [4] та інших. Загалом, цей підхід, імовірно, бере початок від роботи Грассмана з формалізації арифметики 1861 року [5]. Формалізація вимог до димових тестів записується у вигляді аксіом у схемах мови формальних специфікацій RSL – RAISE Specification Language. Результати, представлені в доповіді, продовжують зусилля, розпочаті в [6, 7, 8]. Цю роботу можна розглядати як виконання ще одного невеликого кроку (як це пропонував робити Д.Л. Парнас у своєму огляді [9]) по застосуванню методів формальної розробки в практиці програмування.

Виклад основного матеріалу. У роботі проаналізовано алгебраїчний підхід до проектування та тестування функцій дійсного аргументу. Враховуючи, що багато звичних функцій дійсного аргументу (наприклад, $\sqrt{x}$, $\log$) розглядалися в монографії Коді-Вейта [4], в якості досліджуваних функцій було обрано пару корисних і достатньо простих функцій обчислення довжини дуги меридіана. Наступна схема мови RSL задає необхідні величини, типи та сигнатуру обох функцій. Функція *len* за заданою шириною в радіанах повертає довжину дуги меридіана в метрах. Функція *latitude* за заданою довжиною дуги меридіана в метрах від екватора повертає широту в радіанах (лістинг 1):

```
scheme values = class
  value
    sin      : Real -> Real,
    Pi       : Real,                -- 3.1415926
    a        : Real = 6378137.0, -- екв.піввісь, WGS-84
    maxLen   : Real = len (maxLatitude),
    maxLatitude : Real
  type
    Radian   = {|B: Real :- B >= 0.0 /\ B <= 90.0 * (Pi / 180.0)|},
    Meter    = {|X: Real :- X >= 0.0 /\ X <= maxLen|}
  value
    len      : Radian -> Meter,
    latitude  : Meter -> Radian
end
```

Тепер на мові реалізації (в даному випадку це C#) можна записати сигнатуру методів і заглушки (stub function) для драйвера тестів. До речі, схоже буде зручно перевизначати заглушки для драйвера тестів у похідному класі справжньою реалізацією функцій, що розробляються. Код для заглушок:

```
public abstract class geoA {
    public abstract double len      (double radian);
    public abstract double latitude (double meter);
}
public class stub: geoA {
```

```

        override public double len      (double radian) {return radian};
        override public double latitude (double meter)  {return meter};
    }
    public class geo: stub {
        // місце для розроблюваних функцій
    }

```

Таким чином конструкція спадкування об'єктно-орієнтованої мови використовується для створення поліморфного (узагальненого) коду самого драйвера. Відповідно драйвер тестів не вимагатиме переробки у процесі кодування необхідних функцій.

Реальна перевірка коректності обчислень функцій на місцевості неможлива без спеціального геодезичного обладнання та відповідної освіти. Проте з алгебраїчної точки зору зрозуміло, що попарне застосування функцій має давати результат, який точно збігається з початковою величиною. Ця умова дозволяє негайно записати вимоги для димових тестів. А за допомогою функцій-заглушок можна на самому ранньому етапі розпочати розробку драйвера тестів:

```

values
scheme test = extend values with class
  axiom
  [smoke_test_1]
    all X : Meter :- len(latitude( X )) - X is 0.0,
  [smoke_test_2]
    all B : Radian :- latitude(len( B )) - B is 0.0
end

```

Звісно, в жодній реалізації обидві аксіоми не виконуватимуться повністю. Порушення аксіом зазвичай виникають через помилки округлення [4], які призводять до накопичення певного відхилення від нуля під час обчислень. Таким чином, за допомогою драйвера тестів для згаданих аксіом можна отримати два набори пар (або дві функції): (метри, відхилення) в одному наборі та (радіани, відхилення) в іншому наборі для подальшого аналізу.

Повернемося до досліджуваних функцій: по-перше, функція *len* виводиться із рівності [10, с. 50]:

$$X = \int_0^B M dB = a(1 - e^2) \int_0^B (1 - e^2 \sin^2 B)^{-\frac{3}{2}} dB.$$

Для цього підінтегральна функція розкладається в ряд Маклорена та приймає наступний вигляд після інтегрування:

$$X = a(1 - e^2)(C_0 B - C_2 \sin 2B + C_4 \sin 4B - C_6 \sin 6B + C_8 \sin 8B - \dots), \quad (1)$$

де

$$C_0 = 1 + \frac{3e^2}{4} + \frac{45e^4}{64} + \frac{175e^6}{256} + \frac{11025e^8}{16384} + \dots;$$

$$C_2 = \frac{3e^2}{8} + \frac{15e^4}{32} + \frac{525e^6}{1024} + \frac{2205e^8}{4096} + \dots;$$

$$C_4 = \frac{15e^4}{256} + \frac{105e^6}{1024} + \frac{2205e^8}{16384} + \dots;$$

$$C_6 = \frac{35e^6}{3072} + \frac{315e^8}{12288} + \dots;$$

$$C_8 = \frac{315e^8}{131072} + \dots$$

Зазначимо, що наведені вище коефіцієнти містять більше членів, ніж у [10, с. 50], та уточнені в результаті проведених обчислень і відрізняються від тих, що приведені у [11, с. 28]. Для порівняння використано точнішу специфікацію рівняння з п'ятьма додатковими членами та вихідну версію [10, с. 50].

На мові RSL нескладно записати самі вимоги до вибраних функцій для їх реалізації (вихідна версія, листинг 2):

```
values
scheme length1 = extend values with class
  value
    C0 : Real = 6367449.1458,
    C2 : Real = 16038.5086,
    C4 : Real = 16.8326,
    C6 : Real = 0.0220
  axiom
    all B : Radian :-
      len(B) is C0 * B - C2 * sin(2.0 * B)
              + C4 * sin(4.0 * B) - C6 * sin(6.0 * B)
end
```

По-друге, функція *latitude* виводиться із рівності [10, формула (3.21)]

$$B = \beta + D_2 \sin 2\beta + D_4 \sin 4\beta + D_6 \sin 6\beta + D_8 \sin 8\beta + \dots, \quad (2)$$

яка отримана за допомогою обернення тригонометричних рядів рівності [10, с. 51,52)]. Причому:

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{X}{C_0}; \\ D_2 &= \frac{C_2}{C_0} \left(1 + \frac{C_4}{C_0} - \frac{C_2^2}{2C_0^2} \right); \\ D_4 &= \frac{C_2^2}{C_0^2} - \frac{C_4}{C_0}; \\ D_6 &= \frac{C_6}{C_0} - \frac{3C_2}{C_0} \left(\frac{C_4}{C_0} - \frac{C_2^2}{2C_0^2} \right); \\ D_8 &= \frac{C_8}{C_0} - \frac{4C_6}{C_0} \left(\frac{C_4}{C_0} - \frac{C_2^2}{2C_0^2} \right). \end{aligned}$$

Як і вище, для порівняння використано дві версії функції. Наступна подана специфікація є записом формули [10, с. 51]:

```
length1
scheme latitude1 = extend length1 with class
  value
    e : Real = 10.0,
    D2 : Real = 251882658.8 * e ** -10.0,
    D4 : Real = 37009.6 * e ** -10.0,
    D6 : Real = 74.5 * e ** -10.0
  axiom
    all X : Meter :-
      latitude( X ) is
        let beta = X / C0
        in beta + D2 * sin(2.0 * beta)
              + D4 * sin(4.0 * beta) + D6 * sin(6.0 * beta)
    end
end
```

В цій специфікації відсутній ще один порахований доданок з коефіцієнтом D_8 . Результати роботи реалізації цих функцій мовою C# з коефіцієнтами ($C_0, C_2, C_4, C_6, D_2, D_4, D_6$), значення яких розраховуємо за допомогою зазначених схем, на рис. 1 і 2 відповідають кривим із позначенням *book coeffs*.

Таким чином на ранніх етапах V-подібної розробки програмного забезпечення вдалося сформулювати формальні вимоги до самого програмного забезпечення та драйвера тестів.

Для тестування було використано по двадцять тисяч випадкових значень на інтервалі від 0 до 150 градусів. Зазначимо, що розглядалось 150 градусів, а не 90, як було записано в специфікації лістингу 1, для переконання в періодичності відхилень від ідеального значення 0. Обидва тести, які вираховують відхилення від 0 в залежності від координати (в метрах або радіанах), показали, що вони мають явно виражену періодичну природу (рис. 1 та рис. 2). Як зазначалося вище, одну криву на рисунках отримано з використанням коефіцієнтів формул, взятих з [10, с. 50] та [10, с. 51]. Другу криву – було отримано з використанням додатково порахованих коефіцієнтів із збільшеною кількістю доданків, формули (1) та (2).

Результати роботи реалізації функцій із явно порахованими коефіцієнтами на рис. 1 та рис. 2 (відповідають кривим із позначенням *calculated coefs*), показали поліпшення результатів тестування. Відносна помилка для першого димового тесту складає $1.16 \cdot 10^{-9}$ відсотка ($9.6 \cdot 10^{-5}$), $-6.7 \cdot 10^{-8}$ відсотка ($8.6 \cdot 10^{-10}$ радіана в абсолютних значеннях).

Розглянемо схему RSL з явним підрахунком коефіцієнтів для першого тесту (доданий п'ятий коефіцієнт C8):

```
values
scheme length5 = extend values with class
  value
    e2 : Real = 0.006694379990,    -- кв.ексцентриситета
    C0 : Real = a *(1.0-e2) * (1.0 +    3.0/4.0    * e2
                                + 45.0/64.0    * e2 ** 2.0
                                + 175.0/256.0    * e2 ** 3.0
                                +11025.0/16384.0 * e2 ** 4.0),
    C2 : Real =  a * (1.0 - e2) * ( 3.0/8.0    * e2
                                + 15.0/32.0    * e2 ** 2.0
                                + 525.0/1024.0    * e2 ** 3.0
                                + 2205.0/4096.0    * e2 ** 4.0),
    C4 : Real =  a * (1.0 - e2) * ( 15.0/256.0    * e2 ** 2.0
                                + 105.0/1024.0    * e2 ** 3.0
                                + 2205.0/16384.0 * e2 ** 4.0),
    C6 : Real =  a * (1.0 - e2)* ( 35.0/3072.0    * e2 ** 3.0
                                + 315.0/12288.0 * e2 ** 4.0),
    C8 : Real =  a * (1.0 - e2)* ( 315.0/131072.0* e2 ** 4.0)
  axiom      -- -- Colin Maclaurin, 1698-1746
  all  B : Radian :-
    len(B) is ( C0 * B - C2 * sin(2.0 * B) + C4 * sin(4.0 * B)
               - C6 * sin(6.0 * B) + C8 * sin(8.0 * B))
end
```

Зауважимо, що значення перерахованих коефіцієнтів дещо відрізняються від представлених на лістингу 2:

```
C0=6367449.14576652
C2=16038.5086150243
C4=16.8325996501986
C6=0.0219825966927238
C8=3.05786850009824E-05
```

Результати обчислень першого тесту, де вісь абсцис показує відстань від екватора до поточної точки в градусах, вісь ординат показує отримане відхилення від нуля (рис. 1).

Схема з явним підрахунком коефіцієнтів другого тесту (доданий п'ятий коефіцієнт D8):

```
length5
scheme latitude5 = extend length5 with  class
  value
    D2 : Real = C2/C0 * (1.0 + C4/C0 -  C2**2.0 / (2.0 * C0**2.0) ) ,
    D4 : Real = C2**2.0/C0** 2.0 - C4/C0,
```

```

D6 : Real = C6/C0 - 3.0 * C2 / C0 * (C4/C0 - C2**2.0 / (2.0 * C0**2.0)),
D8 : Real = C8/C0 - 4.0 * C6 / C0 * (C4/C0 - C2**2.0 / (2.0 * C0**2.0))
axiom
  all X : Meter :-
    latitude( X ) is
      let beta = X/C0
      in beta + D2 * sin(2.0*beta) + D4 * sin(4.0*beta)
        + D6 * sin(6.0*beta) + D8 * sin(8.0*beta)
  end
end

```

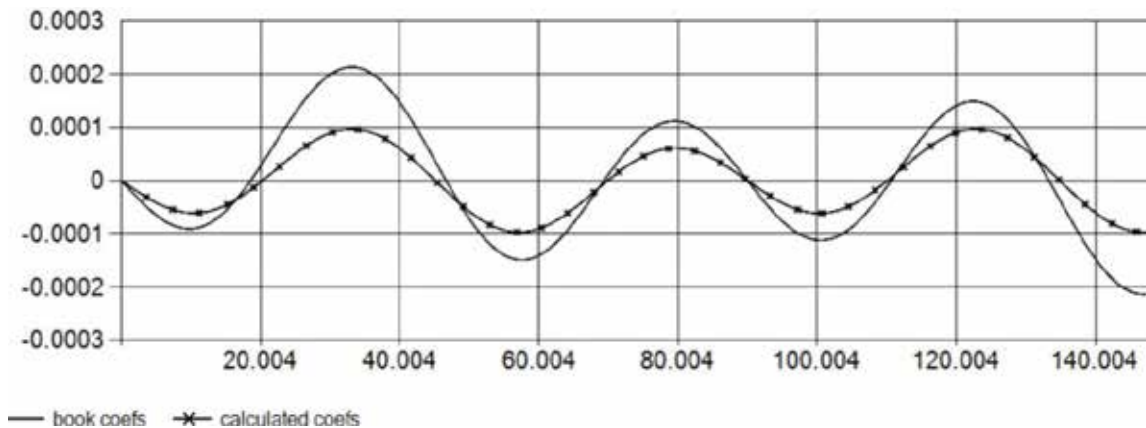


Рис. 1. Перший тест

Значення перерахованих коефіцієнтів наступні:

$C0=6367449.14576652$

$D2=0.00251882657688729$

$D4=3.70095511127976E-06$

$D6=7.44751369051007E-09$

$D8=4.80964571638517E-12$

Результати обчислень другого тесту, де вісь абсцис показує відстань від екватора до поточної точки в градусах, вісь ординат показує отримане відхилення від нуля (рис. 2).

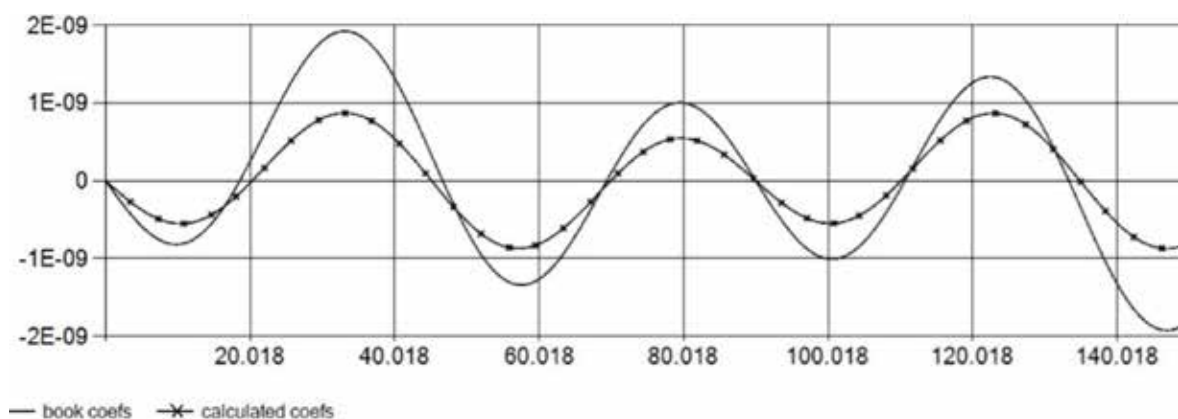


Рис. 2. Другий тест

Аналіз графіків показує, що:

- перераховані коефіцієнти дещо зменшують відхилення від 0 при попарному застосуванні функцій;
- оскільки обидві функції за своєю природою є строго монотонними, формально доцільно виконати тести на перевірку їхньої монотонності на окремих відрізках області визначення. Зокрема, на тих відрізках, де спостерігається найбільше зростання від'ємної похибки між сусідніми точками осі абсцис.

Наприклад, біля точки 0 перевіримо виконання умови монотонності:

```
values
scheme monofunc = extend values with class
  axiom
  [smoke_test_3]
    all B0, B1 : Radian :- B0 < B1 =>
      len(B0) <= len(B1),
  [smoke_test_4]
    all X0, X1 : Meter :- X0 < X1 =>
      latitude(X0) <= latitude(X1)
end
```

За допомогою великої серії тестів (100000000, 25 хвилин обчислень), біля нуля не вдалося виявити порушень монотонності. Частковий код для перевірки цих умов представлений на лістингу 3. Число *double.Epsilon* – це мінімальна додатне число бібліотеки .Net Framework, яке можна представити в типі *double*. Тобто числа *B1* і *B0* в операторі *B1=B0+ double.Epsilon*; виявляються сусідніми точками на розглянутому відрізку. Результати експерименту показують, що два значення функції *len* на сусідніх точках виявляються або рівними, або значення функції на більшому значенні аргументу виявляється більшим.

Частковий код тесту (лістинг 3):

```
Console.WriteLine("# testNo len0 len1 difference" );
B0 = math.degree2radian(BSta);
for ( int i = 0; i < nums; i++, B0=B1+double.Epsilon * steps){
  B1 = B0 + double.Epsilon;
  len0 = arc.len(B0);
  len1 = arc.len(B1);
  diff = len1 - len0;
  if (len0 > len1)
    Console.WriteLine("{0}:{1},{2} : {3}",i,len0,len1,diff);
}
```

Крім того, можна дослідити причину відхилень у точках локальних екстремумів. Але, ймовірно, ці відхилення є наслідком розкладання в ряд Маклорена, і дослідження цього питання виходить за межі нашої роботи.

На завершення утилітою RSLTC [12] згенеруємо умови впевненості (confidence condition), які допомагають записати тести для визначення коректних та некоректних класів еквівалентності та граничних значень:

```
c:\>rsltc32.exe -cc latitude1.rsl
```

В результаті отримаємо:

```
rsltc version 2.5 of Sun Jan 9 20:23:27 2005 Loading values ...
values.rsl:8:60: CC:
-- application arguments and/or precondition let x = Pi, y =
  180.0 in y ~= 0.0 end values.rsl:8:30: CC:
-- subtype not empty      *** ДРУГА УМОВА*** exists B :
Real :- B >= 0.0 /\ B <= 90.0 * (Pi / 180.0) values.rsl:9:30: CC:
-- subtype not empty      *** ТРЕТЯ УМОВА *** exists X :
Real :- X >= 0.0 /\ X <= maxLen
...
rsltc completed: 7 confidence condition(s) generated rsltc completed: 0 error(s) 0
warning(s)
```

Зазначимо, що друга умова:

$\text{exists } B : \text{Real} :- B \geq 0.0 \wedge B \leq 90.0 * (\text{Pi} / 180.0)$

вказує на існування трьох класів еквівалентності для функції *len*: значення широти *B*, які менші за 0; значення у відрізку $[0, 90 * (\text{Pi}/180)]$; значення широти які більше, ніж $90 * (\text{Pi}/180)$.

Третя умова:

$\text{exists } X : \text{Real} :- X \geq 0.0 \wedge X \leq \text{maxLen}$

теж вказує на необхідність використання трьох класів еквівалентності для функції *latitude*.

З точки зору програмування більш корисними видаються функції *len* і *latitude*, вже від двох аргументів. Ці функції обчислюють відстані не від екватора до заданої точки на меридіані, а від однієї заданої точки на меридіані до іншої заданої точки на меридіані. Їх можна буде використовувати для формального тестування функцій для вирішення прямої та зворотної геодезичних задач. Тому, насамкінець, для ілюстрації наведемо ще одну схему для їх визначення. На цій схемі функції визначаються за допомогою лямбда-виразу. Крім того, на схемі є умови для алгебраїчного тестування цих функцій від двох аргументів:

```
latitude1
scheme values2 = extend latitude1 with class
  value
    len: Radian >< Radian -> Meter =
      -\ (B0: Radian, B1: Radian) :-
        let x0 = len(B0), x1 = len(B1)
        in x1 - x0 end,
    latitude: Radian >< Meter -> Radian =
      -\ (B: Radian, X: Meter) :-
        let bx = len(B)
        in latitude(bx + X)    end
  axiom
  [smoke_test_5]
    all B: Radian, X: Meter :- len(B, latitude(B,X)) - X is 0.0,
  [smoke_test_6]
    all B0, B1: Radian :- latitude(B0, len(B0,B1)) - B1 is 0.0
end
```

Висновки. У роботі отримані наступні результати:

- наведено завершений приклад практичного застосування методів формальної розробки функцій дійсного аргументу;
- мовою формальних специфікацій RSL були сформульовані алгоритми обчислення чотирьох різних функцій для отримання довжини дуги меридіанів;
- мовою формальних специфікацій RSL були сформульовані умови для шести димових тестів;
- для однієї з функцій (*len*) виконано перевірку на порушення умови монотонності;
- була використана утиліта RSLTC для статичної перевірки текстів специфікації та отримання класів еквівалентності;
- уточнено сім коефіцієнтів (*C0, C2, C4, C6, D2, D4, D6*) для обчислення розглянутих функцій;
- складено формули та виконано розрахунки для наступних коефіцієнтів (*C8, D8*);
- запропоновано технічний прийом для розробки узагальненого коду драйвера тестів;
- наведено закінчений приклад виконання алгебраїчного тестування функцій дійсного аргументу.

Список використаних джерел:

1. Мейер Б. *Object-oriented software construction* (2-е вид.). Санта-Барбара: ISE Inc, 2000. 1284 с.
2. Haxthausen A. *Lecture Notes on The RAISE Development Method*. Kongens Lyngby: DTU, 1999. 20 с.
3. Піскунов О. Г. Про відмінності між поняттями типу та класу. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія «Фізико-математичні науки»*, 2015, № 3, с. 106–114.
4. Cody W., Waite W. *Software manual for the elementary functions*. New Jersey: Prentice-Hall, 1980. 289 с.
5. Grassmann H. *Arithmetik für höhere*. Stettin: Verlag von Friedrich Nagel, 1861. 224 с.

6. Піскунов О. Г., Тупко Н. П., Топіха Н. В. Формальний погляд на тестування функцій дійсного аргументу. Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами: матеріали XI Міжнародної науково-технічної Internet-конференції, м. Київ, 27 лист. 2024 р. / НУХТ, 2024, с. 218–219.
7. Піскунов О., Тупко Н., Петренко І. Алгебраїчне проєктування програмного забезпечення. *Інформаційні технології та суспільство*, 2024, № 5 (11), с. 50–59.
8. Піскунов О. Г., Сіренко А. Г. Мови формальних специфікацій та документування методів класу. Штучний інтелект та інформаційні технології (AIAT-2024): матеріали першої міжнародної науково-практичної конференції, м. Київ, 3–4 червня 2024 р. / НУХТ, 2024, с. 340–342.
9. Parnas D. L. Really rethinking 'formal methods'. IEEE Computer Society, Computer, 2010, № 43, с. 28–34.
10. Serapinas B. Geodetic Foundations of Maps. URL: <https://cutt.ly/8e9clPjJ> (дата звернення: 10.01.2025).
11. Palikaris A., Tsoulos L., Paradissis D. New Meridian Arc Formulas for Sailing Calculations in Navigational GIS. URL: <https://www.researchgate.net/publication/236611373> (дата звернення: 10.01.2025).
12. George C. RAISE Tool User Guide. UNU-IIST, 2008, 162 p. URL: <https://raisetools.github.io/material/documentation/ug.pdf> (дата звернення: 10.01.2025).

УДК 004.432.2:004.738.5:004.41:004.451
DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.23>

Артем ПОДВИЖЕНКО

старший викладач кафедри комп'ютерних наук та програмної інженерії, Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет», artem.podvizhenko@e-u.edu.ua

ORCID: 0000-0003-1826-7566

Антон ПЕРЕВЕРЗЄВ

старший викладач кафедри комп'ютерних наук та програмної інженерії, Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет», anton.pereverziev@e-u.edu.ua

ORCID: 0000-0003-0778-9203

Леонід ЛИТВИНЕНКО

кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук та програмної інженерії, Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет», leonid.lytvynenko@e-u.edu.ua

ORCID: 0000-0002-0828-383X

Scopus Author ID: 57193444117

Олег СКЛЯРЕНКО

аспірант, Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет», osklyarenko@e-u.edu.ua

ORCID: 0009-0003-4908-0187

РОЛЬ КОНТЕЙНЕРИЗАЦІЇ ТА ВІРТУАЛІЗАЦІЇ НА РІВНІ ОПЕРАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ В РОЗВИТКУ ХМАРНО ОРІЄНТОВАНИХ ДОДАТКІВ

Анотація. Мета цієї роботи дослідити вплив сучасних технологій віртуалізації та контейнеризації на трансформацію підходів до проектування, розробки та експлуатації інформаційних систем у хмарних середовищах, зокрема в контексті переходу від монолітної до мікросервісної архітектури.

Методологія. У статті проведено глибокий аналіз фундаментальної ролі технологій віртуалізації та контейнеризації у трансформації хмарних обчислень. Розглянуто історичний розвиток віртуалізації, вплив гіпервізорів, вимоги до гостьових ОС, а також переваги контейнеризації з акцентом на інструменти Docker та Kubernetes. Проаналізовано архітектуру контейнеризованих середовищ, їхню інтеграцію з хмарною інфраструктурою та нові вимоги до базових ОС, включаючи використання незмінних систем.

Наукова новизна. У роботі узагальнено сучасний підхід до проектування операційних систем для контейнеризованих хмарних середовищ. Особливо підкреслено еволюцію вимог до ОС, розвиток спеціалізованих дистрибутивів, зміну безпекових моделей, а також роль Kubernetes як розподіленої операційної системи для хмари. Окреслено тренди майбутнього розвитку ОС, пов'язані з інтелектуалізацією управління хмарними середовищами.

Висновки. Розуміння ролі та впливу технологій віртуалізації й контейнеризації є критично важливим для ефективного проектування, розробки та підтримки хмарно-орієнтованих додатків. Подальший розвиток операційних систем йтиме шляхом посилення безпеки, оптимізації взаємодії з апаратним забезпеченням та впровадження інтелектуальних механізмів управління для забезпечення стабільності та масштабованості в умовах високої динаміки хмарних середовищ.

Ключові слова: віртуалізація, контейнеризація, хмарні технології, операційні системи, Docker, Kubernetes, хмарно-орієнтовані додатки, мікросервіси, гіпервізор, оркестрація контейнерів.

Artem PODVIZHENKO, Anton PEREVERZIEV, Leonid LYTVYENKO, Oleh SKLIARENKO. THE ROLE OF CONTAINERIZATION AND OS-LEVEL VIRTUALIZATION IN THE DEVELOPMENT OF CLOUD-NATIVE APPLICATIONS

Abstract. The aim of this study is to examine the impact of modern virtualization and containerization technologies on the transformation of approaches to the design, development, and operation of information systems in cloud environments, particularly in the context of the shift from monolithic to microservices architecture.

Methodology. The paper presents an in-depth analysis of the fundamental role of virtualization and containerization technologies in the transformation of cloud computing. It explores the historical development of virtualization, the influence of hypervisors, requirements for guest operating systems, and the benefits of containerization with a focus on tools such as Docker and Kubernetes. The architecture of containerized environments is analyzed, along with their integration with cloud infrastructure and the emerging requirements for base operating systems, including the use of immutable systems.

Scientific Novelty. The study summarizes the modern approach to designing operating systems for containerized cloud environments. It particularly emphasizes the evolution of OS requirements, the development of specialized distributions, changes in security models, and the role of Kubernetes as a distributed cloud operating system. Future trends in OS development are outlined, including the growing role of intelligent management in cloud environments.

Conclusions. Understanding the role and impact of virtualization and containerization technologies is critically important for the effective design, development, and maintenance of cloud-oriented applications. The future evolution of operating systems will move toward enhanced security, optimized hardware interaction, and the implementation of intelligent management mechanisms to ensure stability and scalability in highly dynamic cloud environments.

Key words: virtualization, containerization, cloud technologies, operating systems, Docker, Kubernetes, cloud-oriented applications, microservices, hypervisor, container orchestration.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Епоха цифрової трансформації та експоненційне зростання обсягів даних стимулюють постійний розвиток обчислювальних парадигм. Хмарні обчислення стали домінуючою моделлю, пропонуючи безпрецедентну гнучкість, масштабованість та економічну ефективність. Цей перехід супроводжується зміною архітектурних підходів до побудови додатків – від монолітних гігантів до незалежно розгортаних та масштабованих мікросервісів. Така декомпозиція вимагає відповідних змін на інфраструктурному рівні, і саме тут технології віртуалізації та контейнеризації виступають як ключові фактори успіху. Вони забезпечують необхідний рівень абстракції апаратних ресурсів та операційних систем, дозволяючи розробникам та операційним командам зосередитися на логіці додатків, а не на складнощах базової інфраструктури [11, 4].

Історично першою масовою технологією, що забезпечила ефективне спільне використання фізичних ресурсів, стала віртуалізація. Вона дозволила запускати на одному сервері безліч ізольованих віртуальних машин (ВМ), кожна зі своєю повноцінною операційною системою. Це стало основою для появи концепції інфраструктури як послуги (IaaS) у хмарі [14]. Однак з розвитком мікросервісної архітектури та потребою у ще більшій щільності розміщення додатків та швидкості їх розгортання, на передній план вийшла контейнеризація. Ця технологія пропонує легший механізм ізоляції, що використовує спільне ядро операційної системи хоста, забезпечуючи при цьому необхідний рівень безпеки та портативності [11, 4]. Поява Docker значно спростила процес створення та управління контейнерами, зробивши контейнеризацію доступною та популярною технологією [5, 4]. А з поширенням контейнерів виникла гостра потреба в ефективних інструментах їх оркестрації, що призвело до домінування Kubernetes як платформи для автоматизованого управління життєвим циклом контейнеризованих додатків у масштабі [10, 16].

Ці технології не тільки змінили методи розробки та розгортання, але й суттєво вплинули на вимоги до операційних систем, що функціонують у хмарних середовищах. Традиційні ОС, розроблені для роботи на голому залізі, потребують адаптації та еволюції для ефективної підтримки віртуалізованих та контейнеризованих робочих навантажень.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблема оптимізації розгортання та управління додатками в хмарних середовищах є предметом активних досліджень протягом останнього десятиліття. Поява та стрімкий розвиток технологій контейнеризації та віртуалізації на рівні операційної системи (ОС) суттєво змінили підходи до розробки, тестування та експлуатації хмарно-орієнтованих систем. Аналіз наукових публікацій та технічних звітів дозволяє виділити кілька ключових напрямків досліджень у цій сфері.

Значна увага приділяється порівняльному аналізу продуктивності та ефективності використання ресурсів між традиційною віртуалізацією (гіпервізори типу 1 і 2) та віртуалізацією на рівні ОС (контейнерами). Роботи [2] демонструють, що контейнеризація, завдяки спільному використанню ядра ОС хоста, зазвичай забезпечує менші накладні витрати на процесорний час та пам'ять порівняно з віртуальними машинами, що є критичним для мікросервісних архітектур та високо навантажених додатків [9]. Дослідження також фокусуються на вимірюванні затримок мережевого обміну та продуктивності дискових операцій в контейнеризованих середовищах.

Важливим аспектом є питання безпеки контейнерів. Оскільки контейнери на одному хості ділять спільне ядро ОС, це створює потенційні вектори атак. Дослідники аналізують механізми ізоляції (namespaces, cgroups), вразливості образів контейнерів, безпеку мережевої взаємодії та можливості підвищення рівня безпеки за допомогою спеціалізованих інструментів сканування та моніторингу [4, 5]. Порівняння моделей безпеки контейнерів та віртуальних машин є постійною темою дискусій [14].

Активно досліджується роль систем оркестрації контейнерів, таких як Kubernetes та Docker Swarm, у забезпеченні масштабованості, відмовостійкості та автоматизації управління життєвим циклом хмарно-орієнтованих додатків. Аналізуються алгоритми планування контейнерів, механізми авто масштабування, сервіс-дискавери, управління конфігураціями та секретами. Дослідження також стосуються складності впровадження та підтримки таких систем [7].

Вивчається вплив контейнеризації на процеси розробки та DevOps. Технології, такі як Docker, спрощують створення відтворених середовищ розробки, тестування та розгортання, сприяючи

впровадженню практик неперервної інтеграції та неперервної доставки (CI/CD) [1]. Досліджується ефективність інтеграції контейнерів у конвеєри CI/CD та їхній вплив на швидкість виведення продуктів на ринок.

Незважаючи на значний обсяг досліджень, залишаються актуальними питання оптимізації продуктивності для специфічних навантажень (наприклад, stateful-додатків), розробки уніфікованих підходів до забезпечення безпеки в гетерогенних контейнерних середовищах, а також оцінки довгострокових економічних ефектів від переходу на контейнеризовані хмарно-орієнтовані архітектури. Дане дослідження спрямоване на систематизацію переваг та викликів використання контейнеризації та віртуалізації на рівні ОС, а також на аналіз їхньої синергетичної ролі у становленні сучасних хмарних додатків.

Мета статті полягає в детальному аналізі фундаментальної ролі технологій віртуалізації та контейнеризації у трансформації сучасних хмарних середовищ. Основна увага зосереджена на дослідженні глибокого впливу цих технологій на дизайн, функціональність, еволюцію та нові вимоги до операційних систем, що лежать в основі розробки та експлуатації хмарно-орієнтованих додатків.

Виклад основного матеріалу. Віртуалізація є наріжним каменем хмарних обчислень. Вона дозволяє хмарним провайдерам абстрагувати базове фізичне обладнання та надавати користувачам віртуальні ресурси за запитом. Цю абстракцію забезпечують гіпервізори (Virtual Machine Monitor – VMM), які створюють та управляють віртуальними машинами на одному фізичному сервері [15]. Існують два основні типи гіпервізорів: Type 1 (або «bare-metal»), які працюють безпосередньо на апаратному забезпеченні (наприклад, VMware ESXi, KVM, Xen), та Type 2 (або «hosted»), які працюють як звичайні програми на існуючій операційній системі (наприклад, VirtualBox, VMware Workstation) [15]. У хмарних центрах обробки даних переважно використовуються гіпервізори Type 1 через їхню продуктивність та безпеку.

Для операційних систем, що працюють як гостьові ОС у віртуалізованому середовищі, віртуалізація ставить низку специфічних вимог та викликів. Насамперед, це стосується взаємодії з гіпервізором. Історично, повна віртуалізація вимагала бінарної трансляції привілейованих інструкцій, що могло негативно впливати на продуктивність. Альтернативний підхід, пара-віртуалізація, передбачає модифікацію гостьової ОС для включення спеціальних «гіпервикликів» (hypercalls), які дозволяють їй безпосередньо взаємодіяти з гіпервізором, підвищуючи ефективність [14]. Хоча сучасні процесори мають апаратну підтримку віртуалізації, що значно зменшує накладні витрати, оптимізація драйверів та компонентів гостьової ОС для роботи з віртуалізованим обладнанням (мережевими адаптерами, контролерами сховища) все ще залишається важливою задачею.

Іншим важливим аспектом є динамічне управління ресурсами. У хмарних середовищах ресурси віртуальних машин, такі як CPU та RAM, можуть змінюватися динамічно. Гостьова ОС повинна вміти ефективно реагувати на ці зміни, адекватно перерозподіляти ресурси всередині себе та забезпечувати стабільну роботу додатків [14]. Це вимагає оптимізації механізмів планування процесів та управління пам'яттю в ОС спеціально для віртуалізованого середовища.

Крім того, швидкість операцій вводу/виводу нерідко виявляється обмежуючим фактором у віртуалізованих системах. Для ефективної роботи гостьова ОС потребує оптимізованих віртуальних драйверів для взаємодії з віртуалізованими пристроями, які, своєю чергою, взаємодіють з гіпервізором та фізичним обладнанням. Розвиток технологій, зокрема SR-IOV (Single Root I/O Virtualization), дозволяє VM отримувати прямий доступ до апаратних пристроїв, мінаючи гіпервізор, що суттєво підвищує продуктивність вводу/виводу, однак вимагає відповідної підтримки з боку ОС.

Зрештою, гостьова ОС має коректно обробляти міграцію VM. Можливість «живої» міграції, тобто переміщення працюючої VM між фізичними хостами без переривання роботи, є ключовою функцією хмарних платформ для балансування навантаження та обслуговування. Гостьова ОС повинна бути спроможна впоратися з процесом міграції, зберігаючи стан запущених додатків та активні мережеві з'єднання. Таким чином, віртуалізація трансформувала операційні системи, зробивши їх більш «обізнаними» про віртуалізоване середовище, в якому вони працюють, та оптимізованими для ефективної роботи під управлінням гіпервізора.

Контейнеризація пропонує інший рівень абстракції – на рівні операційної системи, а не апаратного забезпечення. Контейнер – це стандартизований, виконуваний пакет програмного забезпечення, який включає код додатка, бібліотеки, системні інструменти, час виконання та все необхідне для його запуску. Ключова відмінність від VM полягає в тому, що контейнери використовують спільне ядро операційної системи хоста, тоді як кожна VM має власну повноцінну гостьову ОС [4, 11]. Це робить контейнери значно легшими, швидше запускаються та споживають менше ресурсів порівняно з VM [11].

Docker став синонімом контейнеризації, надавши простий та зручний інструментарій для створення, пакування та розповсюдження контейнерів за допомогою образів. Образ Docker – це шаблон тільки для читання, що містить інструкції для створення контейнера. Контейнер – це екземпляр образу, що

виконується [4, 5]. Простота використання Docker сприяла вибуховому зростанню популярності контейнеризації серед розробників.

Однак, управління великою кількістю контейнерів, особливо в розподілених хмарних середовищах, є складним завданням. Саме тут на сцену виходить Kubernetes – відкрита платформа, призначена для автоматизації розгортання, масштабування та управління контейнеризованими додатками. Kubernetes надає механізми для оркестрації контейнерів, що включає автоматизацію процесів розгортання, оновлення, видалення та моніторингу груп контейнерів (відомих як Pod'и) на кластері фізичних або віртуальних вузлів [10, 16]. Платформа також забезпечує автоматичне горизонтальне масштабування Pod'ів, реагуючи на завантаження процесора або інші метрики [16]. Крім того, Kubernetes полегшує управління життєвим циклом додатків, підтримуючи такі стратегії оновлення без простоїв, як канарійські випуски, синьо-зелені розгортання та відкати [10]. Він пропонує інструменти для виявлення сервісів та балансування навантаження, дозволяючи мікросервісам у різних Pod'ах знаходити один одного, взаємодіяти та автоматично розподіляти трафік. Kubernetes також керує зберіганням даних, динамічно надаючи постійні сховища для контейнерів, і забезпечує безпечне зберігання та надання конфігураційної інформації та чутливих даних додаткам [11].

Kubernetes, по суті, стає операційною системою для розподілених хмарно-орієнтованих додатків, працюючи на рівні кластера та абстрагуючи нижчі рівні інфраструктури, включаючи базові ОС вузлів.

Зростання популярності контейнеризації та оркестрації, зокрема через платформи як Kubernetes, значно вплинуло на вимоги до операційних систем, які слугують вузлами кластерів. Хоча традиційні серверні ОС можуть запускати контейнери, вони не є ідеальними для цієї ролі, що призвело до появи спеціалізованих «хмарних» ОС.

Ці нові операційні системи часто є мінімалістичними та незмінними (immutable). Для вузлів Kubernetes оптимальними є легковагі ОС з мінімальним набором компонентів, що включають лише ядро Linux, середовище виконання контейнерів (наприклад, containerd або CRI-O) та агент Kubernetes (kubelet). Прикладами слугують Container-Optimized OS від Google, Fedora CoreOS, RancherOS та Photon OS. Їхня «незмінність» означає, що коренева файлова система доступна лише для читання, а оновлення відбуваються шляхом заміни всього образу ОС, а не окремих пакетів. Такий підхід підвищує безпеку та спрощує управління, усуваючи проблеми з несумісністю пакетів чи помилками конфігурації після оновлень.

Оскільки контейнери використовують спільне ядро ОС хоста, посилена безпека на рівні ядра стає надзвичайно важливою. Це передбачає використання технологій ізоляції, таких як SELinux, AppArmor та seccomp, для обмеження можливостей процесів у контейнерах, а також регулярне оновлення ядра для виправлення вразливостей. Дослідження також ведуться у напрямку використання спеціалізованих мікроядер або унікERNELів для подальшого підвищення безпеки та продуктивності контейнерів.

Крім того, необхідна оптимізація роботи з ресурсами для контейнерів. Хоча Kubernetes управляє розподілом ресурсів між Pod'ами, базова ОС відповідає за низькорівневе управління CPU та пам'яттю для процесів у контейнерах. Вона повинна ефективно використовувати cgroups та інші механізми для ізоляції ресурсів та пріоритезації навантажень згідно з політиками Kubernetes.

Важливою є також інтеграція з мережевими плагінами через інтерфейс Container Network Interface (CNI), який Kubernetes використовує для конфігурації мережі Pod'ів. Базова ОС має коректно взаємодіяти з реалізаціями CNI (як-от Calico, Flannel, Cilium) для забезпечення мережевої зв'язності та застосування мережесхемних політик. У хмарних середовищах часто застосовуються розподілені файлові системи для зберігання даних, доступних з різних вузлів. Тому хмарні ОС повинні мати вбудовану підтримку або можливість легкої інтеграції з такими системами для забезпечення постійного зберігання даних для контейнеризованих додатків.

Важливо зазначити, що, ефективний моніторинг та діагностика є ключовими у складних розподілених середовищах. ОС для хмари мають надавати розширені метрики та інструменти для збору логів, які інтегруються з системами моніторингу та оркестрації на рівні Kubernetes, такими як Prometheus, Grafana чи ELK stack. Таким чином, контейнеризація та оркестрація вимагають від операційних систем значно більшої спеціалізації, мінімалізму, посиленої безпеки на низькому рівні та тісної інтеграції з платформами управління хмарною інфраструктурою.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку. Технології віртуалізації та контейнеризації відіграли і продовжують відігравати вирішальну роль у формуванні сучасного ландшафту хмарних обчислень та розвитку хмарно-орієнтованих додатків.

Віртуалізація заклала фундаментальну основу, дозволивши абстрагувати апаратне забезпечення. Це забезпечило можливість ефективного консолідування та спільного використання фізичних ресурсів (ЦП, пам'ять, сховище, мережа), ізоляції робочих навантажень та стало ключовим елементом для

надання інфраструктури як послуги (IaaS), пропонуючи гнучкість у керуванні ресурсами, яка була неможлива раніше.

Контейнеризація, що набула масового поширення завдяки Docker та системам оркестрації, таким як Kubernetes, вивела ефективність та гнучкість на новий рівень. Вона запропонувала легші, швидші у запуску та менш ресурсомісні (порівняно з віртуальними машинами) одиниці розгортання. Це забезпечило незмінність середовищ між розробкою, тестуванням та продуктивним використанням, значно спростило портативність додатків між різними хмарними провайдерами та локальними інфраструктурами, і стало критично важливим каталізатором для реалізації мікросервісної архітектури та впровадження практик DevOps, прискорюючи цикли розробки та розгортання.

Ці технологічні зрушення неминуче спричинили суттєві зміни у вимогах до операційних систем, що використовуються в хмарних середовищах. Традиційні, універсальні серверні ОС, часто обтяжені зайвими компонентами, великою поверхнею атак та повільнішим часом завантаження, виявилися неоптимальними для високодинамічних, масштабованих та ефемерних навантажень, характерних для контейнерів.

Як наслідок, відбувається чіткий перехід до спеціалізованих хмарно-орієнтованих операційних систем. Ці дистрибутиви характеризуються мінімалізмом (містять лише необхідні для запуску контейнерів компоненти, зменшуючи розмір образу та потенційні вразливості), підвищеною безпекою (часто реалізуючи принципи незмінної інфраструктури (immutable infrastructure), де ОС не модифікується після розгортання, а оновлюється шляхом заміни цілого образу), та можливістю програмного конфігурування через API для автоматизації управління. Вони оптимізовані для максимальної щільності розміщення контейнерів, швидкого завантаження та глибокої інтеграції з платформами оркестрації, такими як Kubernetes, для ефективного управління життєвим циклом контейнерів.

Майбутні операційні системи у хмарі, ймовірно, буде пов'язане з подальшою глибокою спеціалізацією під конкретні типи навантажень (наприклад, AI/ML, високопродуктивні обчислення, обробка даних, edge computing). Очікується посилення безпеки на низькому рівні з використанням апаратних можливостей (наприклад, конфіденційні обчислення confidential computing) та впровадженням принципів нульової довіри (zero trust) на рівні ОС. Глибша інтеграція з апаратним забезпеченням, таким як SmartNICs, DPUs та GPU, стане стандартом для розвантаження мережевих функцій, функцій безпеки та прискорення обчислень безпосередньо в інфраструктурі. Ключовим напрямком стане розвиток самооптимізуючих та самовідновлюваних механізмів на основі штучного інтелекту та машинного навчання (AIOps). Це дозволить ОС динамічно керувати розподіленими ресурсами, передбачати та запобігати збоєм, автоматично масштабуватись та оптимізувати продуктивність в умовах надзвичайно динамічних та складних хмарних середовищ.

Розуміння цієї еволюції – від віртуалізації через контейнеризацію до спеціалізованих, інтелектуальних ОС – є ключовим для архітекторів рішень, розробників та DevOps-інженерів для ефективного проектування, розробки, розгортання та експлуатації надійних, безпечних та продуктивних додатків у сучасній та майбутній хмарі. Це дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо вибору технологічного стеку та стратегій управління інфраструктурою.

Список використаних джерел:

1. Кім Дж., Гамбл Дж., Вілліс Дж., Дебуа П. DevOps Handbook: Як налагодити ефективну взаємодію розробників та IT-служби / пер. з англ. Київ: Фабула, 2020. 512 с.
2. Фельдман А. Р., Новицький О. В. Порівняльний аналіз продуктивності технологій віртуалізації та контейнеризації в хмарних обчисленнях. *Системи обробки інформації*, 2021. № 2(165). С. 115–121. DOI: 10.30748/SOI.2021.165.15.
3. Яровий Р., Улічев О., Скляренко О., Пашорін В. Моделювання мультиагентних систем захисту інформаційних ресурсів. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 2024. 337(3(2)). С. 278–284. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-337-3-42>
4. Cloud Container Technologies: A State-of-the-Art Review. *IEEE Translations on Cloud Computing*. Scribd. URL: <https://www.scribd.com/document/692088192/Container-review> (дата звернення 20.04.2025)
5. Containerization in cloud computing: comparing Docker and Kubernetes for scalable web applications. *International Journal of Science and Research Archive*, 2024, 13(01), 3302–3315. <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2024.13.1.2035>
6. Containerization in Multi-Cloud Environment: Roles, Strategies, Challenges, and Solutions for Effective Implementation. *Arxiv*. URL: <https://arxiv.org/html/2403.12980v2> (дата звернення 20.04.2025)
7. Hightower K., Burns B., Beda J. *Kubernetes: Up and Running: Dive into the Future of Infrastructure* (2nd ed.). Sebastopol: O'Reilly Media, 2019. 334 p.
8. Native Database Systems and Unikernels: Reimagining OS Abstractions for Modern Hardware. *Technische Universität München*. URL: <https://www.cs.cit.tum.de/fileadmin/w00cfj/dis/papers/cumulus.pdf> (дата звернення 22.04.2025)
9. Newman S. *Building Microservices: Designing Fine-Grained Systems*. Sebastopol: O'Reilly Media, 2015. 280 p.

10. On the Optimization of Kubernetes toward the Enhancement of Cloud Computing. *Mathematics* 2024. 12(16), 2476 <https://doi.org/10.3390/math12162476>
11. Managing Persistent Storage in Containers. *CloudOptimo*. URL: <https://www.cloudoptimo.com/blog/managing-persistent-storage-in-containers> (дата звернення 20.04.2025)
12. Resource Optimization: Top Strategies. *EPAM SolutionsHub*. URL: <https://solutionshub.epam.com/blog/post/cloud-resource-optimization> (дата звернення 22.04.2025)
13. Security Threats: Detection and Challenges. *Palo Alto Networks*. URL: <https://www.paloaltonetworks.com.au/cyberpedia/cloud-security-threats-detection-and-challenges> (дата звернення 19.04.2025)
14. Virtualization in Cloud Computing and Types. *GeeksforGeeks*. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/virtualization-cloud-computing-types/> (дата звернення 22.04.2025)
15. What is a Hypervisor? *Amazon*. URL: <https://aws.amazon.com/what-is/hypervisor/> (дата звернення 21.04.2025)
16. What is container orchestration? *RedHat*. URL: <https://www.redhat.com/en/topics/containers/what-is-container-orchestration> (дата звернення 21.04.2025)
17. What Is Cloud Native? *Palo Alto Networks*. URL: <https://www.paloaltonetworks.com/cyberpedia/what-is-cloud-native> (дата звернення 22.04.2025)

УДК 519.2:519.8

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.24>**Олена ПОДКОВАЛІХІНА**

кандидат фізико-математичних наук, доцент,

доцент кафедри програмних засобів,

Національний університет «Запорізька політехніка», epodkovalihina@gmail.com

ORCID: 0000-0002-2182-1559

АНАЛІЗ ВПЛИВУ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ НА РОЗВ'ЯЗОК ЗАДАЧІ РОЗПОДІЛУ ІНВЕСТИЦІЙ У СФЕРІ ГОСПОДАРСЬКОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

Анотація. Розподіл інвестицій у різних галузях економіки визначає їхній майбутній розвиток. В умовах економічної нестабільності прибутковість інвестицій стає непередбачуваною, що ускладнює прийняття рішень. Тому важливо оцінювати наслідки різних стратегій розподілу інвестицій, виключити нераціональні варіанти та визначити оптимальні.

Мета дослідження. Дослідити вплив статистичної невизначеності на оптимальний розподіл інвестицій у сфері господарської діяльності та розробити інструменти для прийняття ефективних інвестиційних рішень у нестабільних умовах.

Методологія. Використано методи перебору даних, статистичного аналізу та багатокритеріальної оптимізації. Математична модель задачі розподілу інвестицій реалізована у середовищі Python з урахуванням рівномірного розподілу прибутку.

Наукова новизна. Сформульовано узагальнену постановку задачі розподілу інвестицій за умов невизначеності. Розроблено алгоритм і програмну реалізацію для розрахунку та аналізу оптимальних стратегій інвестування з урахуванням змінних параметрів прибутковості. Запропонований алгоритм дозволяє: оцінити майбутній прибуток з урахуванням економічної нестабільності; визначити раціональний розподіл інвестицій для різних сценаріїв динаміки прибутку; зменшити ризики втрати інвесторів або залучити нових за рахунок обґрунтованих прогнозів. Досліджено розподіл інвестицій у сільському господарстві зі змінним прибутком (10% та 40%), проаналізовано оптимальні рішення за різними критеріями. Визначено доцільність інвестування в обраний сектор залежно від рівня невизначеності та зовнішніх факторів.

Висновки. Запропонований підхід дозволяє прогнозувати прибутковість інвестицій з урахуванням економічної нестабільності. Визначено критерії оптимального розподілу ресурсів, що знижують ризики інвесторів. Результати можуть бути використані: інвесторами для прийняття рішень у умовах невизначеності; урядовими органами для підтримки стратегічно важливих галузей; аналітиками для моделювання економічних сценаріїв. Перспективи подальших досліджень: розширення моделі на інші типи розподілів прибутку (нормальний, Пуассона); врахування додаткових факторів ризику (наприклад, коливання валют); інтеграція машинного навчання для прогнозування динаміки прибутку. Це дослідження підкреслює важливість аналізу невизначеності в інвестиційних рішеннях та пропонує практичний інструмент для їх оптимізації.

Ключові слова: задача розподілу ресурсів, інвестиції, статистична невизначеність, оптимальний розв'язок, критерії оптимальності, комп'ютерне моделювання.

Olena Podkovalihina. ANALYSIS OF THE IMPACT OF UNCERTAINTY ON SOLVING THE INVESTMENT ALLOCATION PROBLEM IN THE FIELD OF ECONOMIC ACTIVITY

Abstract. The distribution of investments in different sectors of the economy determines their future development. In conditions of economic instability, the profitability of investments becomes unpredictable, which complicates decision-making. Therefore, it is important to assess the consequences of different investment allocation strategies, exclude irrational options and determine the optimal ones.

Research objective. To investigate the impact of statistical uncertainty on the optimal allocation of investments in the field of economic activity and develop tools for making effective investment decisions in unstable conditions.

Methodology. Methods of exhaustive search methods, statistical analysis and multi-criteria optimization were used. The mathematical model of the investment allocation problem was implemented in the Python environment taking into account the uniform distribution of profits.

Scientific novelty. A generalized statement of the investment allocation problem under conditions of uncertainty was formulated. An algorithm and software implementation were developed for calculating and analyzing optimal investment strategies taking into account variable profitability parameters. The proposed algorithm allows: to estimate future profits taking into account economic instability; determine a rational distribution of investments for different scenarios of profit dynamics; reduce the risks of losing investors or attracting new ones due to substantiated forecasts. The distribution of investments in agriculture with variable profits (10% and 40%) was studied, optimal solutions were analyzed according to various criteria. The feasibility of investing in the selected sector was determined depending on the level of uncertainty and external factors.

Conclusions. The proposed approach allows predicting the profitability of investments taking into account economic instability. Criteria for optimal resource allocation that reduce investor risks were determined. The results can be used: by investors for decision-making under uncertainty; by government agencies to support strategically important industries; by analysts to model economic scenarios. Prospects for further research: expanding the model to other types of profit distributions (normal, Poisson); taking into account additional risk factors (for example, currency fluctuations); integrating machine

learning to predict profit dynamics. This study highlights the importance of uncertainty analysis in investment decisions and offers a practical tool for their optimization.

Key words: resource allocation problem, investment, statistical uncertainty, optimal solution, optimality criteria, computational modeling.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Сучасні економічні умови висувають нові вимоги до ефективного розподілу інвестиційних ресурсів між різними секторами господарства [2, 4, 5, 7, 8]. Особливої уваги потребує питання оптимального вкладення коштів у розвиток сільських регіонів [8]. Розглянемо задачу розподілу інвестицій у сфері господарської діяльності на прикладі задачі оптимального розподілу коштів в окремі сільські регіони для забезпечення максимального прибутку.

Розглядається система з n сільських регіонів $R_i, i = \overline{1, n}$. Інвестор має в розпорядженні обмежений бюджет у розмірі m грошових одиниць. Для кожного регіону R_i передбачається можливість вкладення коштів у діапазоні $k, k = \overline{0, m}$. Прибутковість інвестицій є функцією від обсягу вкладених коштів у кожен конкретний регіон. Необхідно визначити оптимальний розподіл інвестиційного бюджету між регіонами, що забезпечує максимізацію сумарного прибутку при заданих обмеженнях.

Нехай $g_i(x_j), i = \overline{1, n}$ – прибуток від інвестування $x_j, j = \overline{0, m}$ грошових одиниць коштів у сільський регіон R_i . $P_i(x_j), i = \overline{1, n}$ – прибуток від інвестування $x_j, j = \overline{0, m}$ одиниць коштів у відповідні регіони R_i .

Математична постановка задачі наступна:

$$F = \sum_{j=1}^n P_i(x_j) \rightarrow \max$$

$$\sum_{j=1}^m x_j \leq m,$$

де n – кількість регіонів;

x_j – грошових одиниць коштів інвестовано у сільський регіон R_i ;

$P_i(x_j)$ – прибуток від інвестування x_j одиниць коштів у відповідний регіон R_i , P_i можуть варіюватися відповідно заданому закону розподілу;

m – максимальна кількість грошових одиниць коштів інвестицій;

F – величина сумарного прибутку за всіма регіонами.

Важливим аспектом управління інвестиційними ресурсами є невизначеність прибутків через відсутність повної інформації про прогностні значення показників [2]. Внутрішні (показник економіки, сфера господарської діяльності) та зовнішні фактори (світові ціни на продукцію, логістичні витрати, військові дії, економічна політика) мають вплив на динаміку прибутку. Це впливає на притік інвестицій, в тому числі іноземних, оскільки інвесторам важливо отримати не менше певної величини сумарного прибутку, щоб прорахувати доцільність інвестування в ту чи іншу господарську сферу. Є доцільним оцінити вищенаведену величину для стандартної норми динаміки прибутку та норми динаміки прибутку у випадку інфляційної економіки на основі даних для обраної сфери господарської діяльності за попередні роки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Інвестиційна діяльність має ключову роль для розвитку країни. Україна потребує створення сприятливих умов для інвесторів, що дозволить збільшити притік іноземних інвестицій. Питанням залучення іноземних інвестицій в українську економіку присвячені наукові праці [2, 4, 5, 7, 8], в яких автори аналізують динаміку, структуру та перспективи інвестування, а також визначають ключові чинники, що впливають на інвестиційні процеси в Україні.

В статті [8] проаналізовано сучасний стан та динаміку залучення іноземних інвестицій за останніх двадцять років. Досліджено причини, що мали негативний вплив на обсяги капіталовкладень. Визначено пріоритетні сфери для інвестування: промисловість, сільське і лісове господарство, оптова та роздрібна торгівля. Окреслено перспективи інвестиційної діяльності.

У статті [7] обґрунтовано необхідність залучення прямих іноземних інвестицій в національну економіку. Досліджено систему заходів, необхідних для формування ефективної інвестиційної стратегії, забезпечення високого рівня захисту інтересів та прав іноземних інвесторів.

В роботі [4] проведено дослідження географічної структури прямих іноземних інвестицій в Україну за наступний проміжок часу: 1995 – 2019 рр. Проаналізовано зміни кількості країн-інвесторів та їх показників інвестицій. Оцінено вплив інвестицій досліджуваних країн на економічний розвиток України. Визначено основних інвесторів та країни з найменшими інвестиціями, з якими слід розширювати інвестиційне співробітництво.

У дослідженні [2] систематизовано теоретико-методичні засади управління інвестиційними ресурсами підприємств. Автори ідентифікували ключові причини виникнення невизначеності: інформаційні дефіцити (неповний перелік впливових факторів, відсутність надійних прогностичних даних), наслідки для управління (зниження точності оцінок ефективності, підвищення ризиків прийняття рішень). Ці положення підкреслюють необхідність розробки адаптивних методів управління інвестиціями, здатних враховувати стохастичну природу економічних процесів.

В роботі [5] проаналізовано концепції до визначення сутності інвестиційного проекту. Запропонована методика дозволяє усунути неоднозначність у визначенні інвестиційних ініціатив, що є важливим для: формування інвестиційної політики підприємств; розробки стандартів проектного менеджменту; вдосконалення механізмів оцінки ефективності. Подальшим етапом дослідження повинна стати побудова системи ухвалення інвестиційних рішень в умовах невизначеності й ризику.

Задача розподілу інвестицій затребувана у різних сферах господарської діяльності [10-14, 16]:

- інвестиції венчурного капіталу [10]: проаналізовано зміни в моделях інвестицій для інвесторів венчурного капіталу (VC) з різними структурами управління; досліджено вибірку венчурних інвестицій, здійснених у період 1998–2014 років у 28 країнах-членах ЄС та Ізраїлі;

- інвестиції в мережеву інфраструктуру [12]: виведено оптимальну перспективну мережеву плату, що максимізує соціальне забезпечення, враховуючи частковість інвестицій і невизначений споживчий попит;

- інвестиції в нерухомість [14]: досліджено статистичні властивості доходів від нерухомості, ґрунтуючись на аналізі даних з Німеччини; аналіз характеристик розподілу показує, що прибутки від нерухомості в Німеччині за досліджуваний період не розподілялися нормально і відповідали логістичному розподілу;

- інвестиції у сектор електроенергії [16]: дослідження базується на наборі даних зі 124 DSO і застосовує методологію, що поєднує факторний аналіз і модель Tobit, щоб оцінити роль ринкових, регуляторних, інвестиційних факторів;

- інвестиції у нематеріальні активи (логістичні системи, платформний бізнес, аналіз великих даних і штучний інтелект) [13]: проаналізовано вплив інвестиційної діяльності, пов'язаної з нематеріальними активами на ринкову вартість дистриб'юторських компаній, зареєстрованих на ринку KOSDAQ; також досліджується вплив ефективності та інтенсивності такої інвестиційної діяльності на ринкову вартість розподільчих компаній, виміряну співвідношенням ринкової ціни до балансової вартості (PBR);

- інвестиції в транспортну інфраструктуру [11]: досліджено розмір та вплив інвестицій державного сектора Швеції в транспортну інфраструктуру.

У роботах [1, 3, 6, 9, 15, 17] розроблено комплекс економіко-математичних моделей та методів оптимізації інвестиційних рішень.

В роботі [6] авторами запропоновано інноваційний підхід до: моделювання впливу статистичної невизначеності на оптимальність інвестиційних рішень; ідентифікації множини потенційно оптимальних планів розподілу коштів; систематизації альтернативних критеріїв оптимальності.

В роботі [1] розроблено методику оцінки ставки дисконтування, яка: інтегрує премію за ризик для різних видів облігацій; враховує особливості дискретних та неперервних розподілів; дозволяє точніше визначати інвестиційну привабливість активів та адаптувати оцінки до різних ринкових умов.

У роботі [17] наведено статистичні моделі, які визначають можливі технологічні варіанти для покращення продуктивності систем розподілу DSO. Висновки ґрунтуються на кількох статистичних моделях, побудованих на наборі технічних даних, отриманих від 64 відокремлених європейських операторів розподілу електроенергії. Наведені моделі надають можливість операторам розподільчих мереж та регуляторам енергетики кількісно оцінити вплив інвестицій у рішення автоматизації на рівень надійності.

У роботі [3] побудовано та досліджено економіко-математичну модель інвестиційного забезпечення регіонального промислового кластера. Модель заснована на порівняльному підході щодо вибору оптимальних інвестиційних проектів з ряду схожих за стартовими умовами реалізації. Використання запропонованої моделі надає можливість сформувати раціональний інвестиційний баланс щодо нових інвестиційних ресурсів для промислового кластера та напрямів використання.

Задача мінімізації витрат у розподільних мережах розглядається в роботі [15] за допомогою підходу до оптимізації головного-підлеглого. Цільова функція одночасно мінімізує витрати на закупівлю енергії в шині підстанції, а також інвестиційні та експлуатаційні витрати на фотоелектричні джерела протягом планового періоду в 20 років. Чисельні результати систем IEEE 33-bus і 69-bus демонструють, що за допомогою запропонованої методології оптимізації можна усунути приблизно 27% річних витрат на експлуатацію в обох системах.

В роботі [9] провели дослідження щодо інвестиційних можливостей, аналізуючи вплив асиметрії неперервних розподілів ймовірностей прибутку.

Мета статті: дослідити вплив статистичної невизначеності на оптимальний розподіл інвестицій у сфері господарської діяльності та розробити інструменти для прийняття ефективних інвестиційних рішень у нестабільних умовах.

Виклад основного матеріалу дослідження. Була розроблена програмна реалізація для визначення оптимального розподілу обмежених інвестиційних ресурсів між декількома регіонами з метою максимізації сумарного прибутку, з урахуванням можливих коливань прибутковості.

Основні етапи програмної реалізації (фрагменти наведено на рис. 1):

1. Ініціалізація параметрів:
 - визначається кількість регіонів (n) та максимальний бюджет (m);
 - задається матриця базової прибутковості для кожного регіона при різних обсягах інвестицій;
 - встановлюються параметри експериментів (кількість ітерацій, відсоток відхилення).
2. Генерація варіантів розподілу:
 - програма створює всі можливі комбінації розподілу інвестицій за допомогою `itertools.product`;
 - для кожного варіанту перевіряється, чи не перевищує сумарний обсяг інвестицій заданий бюджет.
3. Розрахунок прибутку з урахуванням невизначеності:
 - до базової матриці прибутковості додається випадкове відхилення ($\pm deviation\_percent$);
 - для кожного допустимого розподілу обчислюється сумарний прибуток.
4. Визначення оптимального розподілу:
 - програма знаходить варіант розподілу інвестицій, який забезпечує максимальний прибуток;
 - зберігаються як оптимальний розподіл, так і всі проміжні результати.
5. Експорт результатів: дані зберігаються у файл (Excel або CSV) в обраній папці.

Особливості програмної реалізації:

1. Обробка невизначеності:
 - випадкові коливання прибутковості імітуються за допомогою генератора випадкових чисел;
 - відсоток відхилення можна регулювати (`deviation_percent`).
 2. Гнучкість вхідних даних:
 - можна задавати довільну матрицю прибутковості;
 - підтримується будь-яка кількість регіонів та рівнів інвестування.
 3. Візуалізація результатів: дані експортуються у зручному для аналізу форматі.
- Систематизуємо оптимальні стратегії для різних типів інвесторів.

1. Критерій частотності (Frequency Criterion): відбирає плани, які зустрічаються у $>10\%$ кількості експериментів.

Доцільність застосування:

- коли потрібно визначити найбільш стабільні стратегії розподілу інвестицій;
- для оцінки «надійності» плану: високий % появи свідчить про його стійкість до змін вхідних даних (наприклад, коливань прибутковості).

2. Критерій середньої ефективності (Mean Profit Criterion): сортує плани за середнім сумарним прибутком.

Доцільність застосування:

- для максимізації очікуваного доходу без урахування ризиків;
- коли інвестор орієнтований на довгострокову прибутковість, а не на мінімізацію втрат.

3. Критерій ймовірності успіху (Probability Threshold Criterion): Відбирає плани, де ймовірність отримати прибуток вище заданого рівня $\geq$ певного значення (наприклад, 80%).

Доцільність застосування:

- для консервативних інвесторів, які мінімізують ризик недоотримання цільового прибутку;
- у умовах високої невизначеності (наприклад, кризи, війни), коли критично забезпечити мінімально прийнятний дохід.

Рекомендації щодо комбінації критеріїв:

1. Для агресивних інвесторів: спочатку критерій 2 (максимізація прибутку), потім критерій 1 (стабільність). Ігнорувати критерій 3.

Приклад: венчурні інвестиції у стартапи.

2. Для поміркованих стратегій: критерій 1 $\rightarrow$ критерій 2 $\rightarrow$ відсікання планів із ймовірністю успіху $<70\%$.

Приклад: фонди змішаних інвестицій.

```

...
def investment_allocation(n, m, profit_matrix, num_experiments, deviation_percent, output_filename):
    ...
    # Генеруємо матрицю P i(x_j) з випадковим відхиленням
    P = profit_matrix * (1 + (deviation_percent/100) * (2*np.random.random(profit_matrix.shape) - 1))
    # Генеруємо всі можливі розподіли інвестицій
    allocations = list(product(range(m+1), repeat=n))

    results = []
    max_profit = -np.inf
    optimal_allocation = np.zeros(n)

    for alloc in allocations:
        total_invested = sum(alloc)

        if total_invested <= m:
            current_profit = sum(P[i, alloc[i]] for i in range(n))

            # Зберігаємо всі результати
            results.append(list(alloc) + [current_profit])

            if current_profit > max_profit:
                max_profit = current_profit
                optimal_allocation = alloc
    ...
def export_results(results, optimal_alloc, max_profit, filename):
    """Експорт результатів у файл"""
    headers = [f'Регіон_{i+1}' for i in range(len(optimal_alloc))] + ['Сумарний_прибуток']
    df = pd.DataFrame(results, columns=headers)
    if filename.endswith('.xlsx'):
        with pd.ExcelWriter(filename) as writer:
            df.to_excel(writer, sheet_name='Результати', index=False)
            optimal_df = pd.DataFrame([list(optimal_alloc) + [max_profit]], columns=headers)
            optimal_df.to_excel(writer, sheet_name='Оптимальний план', index=False)
    elif filename.endswith('.csv'):
        df.to_csv(filename, index=False)
        with open(filename, 'a') as f:
            f.write("\nОптимальний план:\n")
            pd.DataFrame([list(optimal_alloc) + [max_profit]], columns=headers).to_csv(f, index=False,
header=False)
    else:
        raise ValueError("Підтримуються лише .xlsx або .csv файли")
    ...

```

Рис. 1. Фрагменти програмної реалізації для визначення оптимального розподілу

3. Для консервативних інвесторів: критерій 3 (ймовірність $\geq 90\%$) $\rightarrow$ критерій 2 (середній прибуток), критерій 1 не обов'язковий.

Приклад: Державні облігації або інфраструктурні проекти.

Проілюструємо роботу алгоритму та застосування критеріїв оптимальності наступним прикладом. Для інвестування чотирьох сільських регіонів інвестор може виділити сім грошових одиниць коштів. Нехай $g_i(x_j), i=1,4$ – прибуток від інвестування $x_j, j=0,7$ грошових одиниць коштів у сільський i -й регіон (табл. 1).

В табл. 2 наведено динаміку прибутку в аграрному секторі України за 2020–2024 роки на основі даних Державної служби статистики України.

Таблиця 1

Прибуток від інвестування коштів у сільські регіони

$g_i(x_j)$	x_j							
	0	1	2	3	4	5	6	7
$g_1(x_j)$	0	10	15	20	30	32	34	35
$g_2(x_j)$	0	30	40	50	55	60	65	70
$g_3(x_j)$	0	20	25	30	35	40	45	50
$g_4(x_j)$	0	5	10	15	20	40	45	50

Таблиця 2

Динаміка прибутку в аграрному секторі України (2020–2025)

Рік	Прибуток
2020	+15–20%
2021	+25–30%
2022	-30–40%
2023	-10–15%
2024	+5–10%

Розглянемо приклад для наступних випадків:

- прибуток (табл. 1) може змінюватися за рівномірним законом у межах 10% (на основі даних прибутку за 2023-2024 рр.);
- прибуток (табл. 1) може змінюватися за рівномірним законом у межах 40% (на основі даних прибутку за 2021-2022 рр.).

Знайдемо оптимальні плани задачі розподілу інвестицій для випадку, коли прибуток підпорядковується рівномірному закону розподілу з 10% відхиленням. Зробимо 10000 експериментів. Для кожного запуску будемо фіксувати оптимальний план та значення прибутку (рис. 2).

0115	_0520_	_0610_	_1222_	_1231_	_1240_	_1312_	_1321_	_1330_	_1411_	_1420_	_1510_	_2221_	_2230_	_2311_	_2320_
94,957	92,7022	93,0539	90,0664	90,5271	88,8683	93,324	96,2511	95,1921	95,3128	92,013	93,7524	89,3992	90,8369	95,9178	95,5935
94,8111		91,2504	91,1178		91,9175	95,3217	91,3599	95,3488	95,2342	92,2741	93,2759	92,6392	91,1487	96,9472	93,0356
93,0639		91,6493	91,5834		90,566	96,1959	92,8644	94,2839	96,1449	94,1689	93,1821	90,3892	88,7202	96,1654	95,5145
95,9424		93,3518	90,275		91,4903	92,1672	96,0464	94,0299	91,7258	94,8277	95,6715		91,8592	96,1398	96,2527
96,6261		92,4406			93,039	93,5704	94,1333	93,7506	93,3033	94,1208	96,9836		91,9852	97,6748	95,0303
91,8184		92,1301			90,8905	97,1422	96,3623	93,8319	95,0229	94,5684	96,6062			93,3919	95,1113
94,2044		89,677			89,8964	94,4572	95,2792	95,9517	95,8846	96,0522	93,2831			94,0311	97,1894
92,8438		90,8134			90,6246	95,7665	93,887	97,1236	94,8251	94,4205	95,5438			98,2373	93,4927
94,9924		88,4897			91,524	91,5845	95,5061	93,7801	96,3595	94,8472	92,2069			92,9357	92,7215
90,8356		91,1147			88,2234	96,9339	94,6074	96,0925	91,8134	91,2421	94,0412			94,1662	91,9743
91,1447		90,8705			90,9016	96,2969	92,821	95,7858	89,3351	93,7315	91,5406			96,5264	95,2012
96,7804		89,9883			88,7764	95,0636	97,6209	94,2612	96,5412	94,0524	95,5636			93,5822	96,7152
92,4028		89,9914			90,2771	94,8959	96,7143	98,1122	93,5213	95,5021	96,078			96,4776	95,3718
95,1956		89,4739			91,7161	97,1523	94,2309	91,5151	94,0094	94,2216	92,8695			94,5533	97,3948
96,0774		92,3097			91,388	90,6736	91,1751	95,3288	95,2293	92,9881	93,5724			96,047	96,7607
93,5942		90,7337				95,9531	96,7929	89,3105	93,234	94,8128	88,7759			95,6996	90,7993
91,7769		90,6868				97,4176	93,8612	96,3208	95,4537	97,0859	96,6144			94,7928	96,9685
95,8782		89,6071				94,8661	92,8081	97,7199	93,6235	93,8497	91,5712			92,7205	96,3131
94,1633		89,9805				94,5506	93,6511	95,7051	97,3482	96,481	92,3255			92,546	97,0764
93,5828		90,6752				96,0707	95,1035	93,8773	95,082	96,5781	92,9983			96,2733	92,8491
96,6847		90,1489				93,42	96,664	96,1786	96,4848	88,8984	94,4962			89,8409	96,1982
88,092		91,5664				93,1919	96,9496	95,5649	93,5325	97,6439	93,7837			94,6302	95,7935
95,3474		91,2237				96,4371	94,4891	98,0456	92,2368	92,0362	94,3485			94,118	96,6595
92,5846		90,0858				94,7964	95,7753	96,5483	89,8418	96,6964	90,0914			94,3323	95,158
95,0925		92,7459				93,2184	93,3306	95,3303	96,4123	97,2606	95,1543			94,4846	93,8496
94,9319		90,8074				93,9477	95,8998	94,7242	93,0305	96,0957	95,7946			96,5451	91,0144
94,7864		91,1913				95,7368	95,1243	95,3564	94,5085	96,694	94,3292			95,7026	93,1227
93,6763		91,0969				93,8742	92,5896	94,6307	96,4119	89,5367	91,3167			96,679	94,2875
95,267		90,9597				95,4822	91,4543	97,0888	94,8642	93,8169	95,2186			95,9972	96,0598
94,4087		92,0549				95,2013	96,0276	98,2026	95,1254	90,8164	91,8331			94,455	91,0692

Рис. 2. Фрагмент таблиці значень оптимального плану та значення прибутку для 10% відхилення

Було отримано 22 набори оптимальних планів. Застосуємо комбінацію критеріїв оптимальності для поміркованих стратегій. Першим кроком застосуємо критерій частотності. Відсортуємо за цим критерієм оптимальні плани, що мають кількість (у відсотках) більшу за 10% (табл. 3). Отримали 4 оптимальних планів, що відповідають розглянутому критерію. Застосуємо критерій середньої ефективності та знайдемо середньоарифметичний сумарний прибуток для 4 оптимальних планів (табл. 4). Застосуємо критерій ймовірності успіху та відберемо плани, що забезпечують отримання прибутку вище 93,5 од. з ймовірністю $\geq 70\%$ (табл. 5).

Таблиця 3

Кількість оптимальних планів у відсотках

План	Кількість, відсотки
0 1 1 5	13
1 4 2 0	11,9
1 5 1 0	17,4
4 2 1 0	12,6

Таблиця 4

Середньоарифметичний сумарний прибуток, од.

План	Середньоарифметичний сумарний прибуток, од.
0 1 1 5	94
1 4 2 0	94,5
1 5 1 0	94,4
4 2 1 0	94

Таблиця 5

Ймовірність отримати прибуток, більший за 93,5 од., відсотки

План	Ймовірність отримати прибуток, більший за 93,5 од., відсотки
1 4 2 0	71,7

На підставі аналізу отриманих оптимальних планів для реалізації рекомендовано наступний розподіл інвестиційних коштів: у перший сільський регіон інвестувати 1 грошову одиницю, у другий регіон – 4 од., у третій – 2 од., у четвертий – 0 од.

Знайдемо оптимальні плани задачі розподілу інвестицій для випадку, коли прибуток підпорядковується рівномірному закону розподілу з 40% відхиленням. Зробимо 10000 експериментів. Для кожного запуску будемо фіксувати оптимальний план та значення прибутку (рис. 3).

Для 10000 запусків було отримано 60 наборів оптимальних планів. Застосуємо комбінацію критеріїв оптимальності для консервативних інвесторів. Застосуємо критерій ймовірності успіху та відберемо плани, що забезпечують отримання прибутку вище 100 од. з ймовірністю $\geq 90\%$ (табл. 6). Отримали 25 оптимальних планів, що відповідають розглянутому критерію. Застосуємо критерій середньої ефективності та знайдемо середньоарифметичний сумарний прибуток для 25 оптимальних планів (табл. 6).

На підставі аналізу отриманих оптимальних планів для реалізації рекомендовано наступний розподіл інвестиційних коштів: у перший сільський регіон інвестувати 3 грошові одиниці, у другий регіон – 3 од., у третій – 1 од., у четвертий – 0 од. Даний оптимальний план має максимальне значення за критерієм середньої ефективності.

У випадку, коли поставлена задача мінімізувати ризик, то слід додатково застосувати критерій частотності (табл. 7). В цьому випадку для реалізації рекомендовано наступний розподіл інвестиційних коштів: у перший сільський регіон інвестувати 1 грошову одиницю, у другий регіон – 5 од., у третій – 1 од., у четвертий – 0 од.

Висновки та перспективи розвитку. Проведене дослідження довело ефективність запропонованого підходу до розподілу інвестиційних ресурсів у умовах економічної нестабільності. Ключові результати роботи включають:

1. Розробку інструменту прогнозування прибутковості, який враховує вплив невизначеності через: моделювання рівномірного розподілу прибутковості з заданим відсотком відхилення; багатокритеріальну оптимізацію для різних сценаріїв.

0106	0115	0124	0142	0160	0205	0214	0223	0232	0241	0250	0313	0322	0331	0340
94,7394	100,451	98,761	97,2155	102,048	98,4072	101,006	102,985	105,517	97,8178	95,5281	102,393	114,446	100,016	110,901
103,383	114,007			97,3652	96,642		106,53		99,89	98,8367	99,9977	112,934	110,362	109,119
86,4492	101,867			100,627	102,505				110,169	105,495	102,532	109,119	108,304	109,434
104,629	110,213			97,788	94,2631					109,683	102,703	108,953	107,109	112,263
89,7654	94,039			95,9509	99,992					98,7142	108,301	115,92	106,349	108,6
96,7318	108,608			103,586	101,23					104,9	104,245	114,734	99,6452	108,31
88,4617	110,29			99,492	100,101					106,818	114,26	105,976	116,545	107,652
99,735	117,813			104,097	107,932					100,199	115,407	113,489	108,879	117,126
100,792	102,629			91,2767	94,3951					110,455	94,967	101,666	98,1518	113,908
98,9007	100,693			103,943	102,33					98,7372	115,227			112,196
102,633	101,533			100,686	98,4694					108,381	118,378			112,423
101,617	109,617			95,8854	107,394					101,278	107,338			103,911
99,1447	112,961			96,4949	105,101					104,99	101,011			104,693
96,7512	103,323			104,218	107,772					87,6291	116,098			116,994
93,4782	102,842			94,957	96,2859					103,39	100,723			106,046
100,308	105,48				103,356					95,4752				112,431
100,35	109,309				107,412					104,262				112,872
103,015	102,58				104,212					108,534				100,889
102,647	106,289				108,512					98,4274				107,237
	121,341				99,195					103,933				103,34
	118,914				97,6672					106,066				110,604
	114,945				109,635					97,6342				112,101
	110,002				103,05					100,808				109,109
	101,447				104,408					99,6728				114,433
	105,231				110,033					105,614				103,129
	111,647				104,39					105,872				106,355
	108,763				106,721					105,39				105,647
	111,488				94,9526					97,1115				114,376
	105,797				109,232					98,8759				102,592
	116,358				100,899					97,7401				110,363
	111,14				106,124					99,7961				110,831

Рис. 3 Фрагмент таблиці значень оптимального плану та значення прибутку для 40% відхилення

Таблиця 6

Критерій ймовірності успіху та критерій середньої ефективності

План	Ймовірність отримати прибуток, більший за 100 од., відсотки	Середньоарифметичний сумарний прибуток, од.
0 2 1 4	100	101
0 2 2 3	100	104,8
0 2 3 2	100	105,6
0 3 2 2	100	110,8
0 3 4 0	92,3	108,4
0 4 2 1	100	110,2
0 4 3 0	90	108,4
0 5 1 1	93	108,7
0 5 2 0	90,7	108,6
1 1 0 5	100	106,4
1 1 1 4	100	104,2
1 3 1 2	93,8	110,2
1 3 2 1	92	110,1
1 3 3 0	92,3	110,6
1 4 1 1	92,3	110,7
1 4 2 0	93,8	110,8
1 5 1 0	92	109,9
2 2 1 2	100	106,8
2 3 1 1	96,3	111,2
2 3 2 0	94,7	111,6
2 4 1 0	94,4	111,2
3 2 2 0	92,5	107,1
3 3 1 0	95,5	112,1
4 2 1 0	92,7	109,6
4 3 0 0	100	107,7

Таблиця 7

Кількість оптимальних планів у відсотках

План	Кількість, відсотки
1 5 1 0	11,3

2. Систему критеріїв оптимальності, що дозволяє: виявляти статистично значущі стратегії розподілу (критерій частотності); максимізувати очікуваний дохід (критерій середньої ефективності); контролювати ризики через ймовірнісні межі (критерій ймовірності успіху).

3. Практичну цінність для різних груп користувачів: інвестори отримують інструмент для обґрунтованого вибору стратегій у нестабільних умовах; органи влади можуть використовувати модель для підтримки ключових галузей; аналітики – для сценарного моделювання з урахуванням зовнішніх шоків.

4. Перспективи подальших досліджень: впровадження складніших розподілів (нормальний, Пуассона); інтеграція додаткових факторів ризику (валютні коливання, політична нестабільність); застосування методів машинного навчання для прогнозування динаміки прибутковості.

Отримані результати підтверджують, що запропонована методика: знижує інвестиційні ризики за рахунок кількісного аналізу невизначеності; забезпечує гнучкість прийняття рішень через модульну структуру критеріїв; відкриває нові напрями для дослідження стохастичних моделей в економіці. Дослідження становить теоретичну базу для подальшого розвитку інструментів управління інвестиціями в умовах високої волатильності ринків.

Список використаних джерел:

1. Бобиль В. В., Гненний О. М., Пивоварова Г. Б. До питання оцінки ефективності інвестицій в умовах ризику. *Ефективна економіка*. 2021. № 4. DOI: <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2021.4.2>
2. Запорожець Г. В. Теоретико-методичні засади управління інвестиційними ресурсами організації. *Бізнес Інформ*. 2020. № 4. С. 433–439. DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2020-4-433-439>
3. Македон В., Михайленко О. Управління внутрішніми інвестиційними проектами в регіональному промисловому кластері підприємств. *Підприємництво та інновації*. 2022. № 25. С. 56–63. DOI: <https://doi.org/10.32782/2415-3583/25.9>
4. Маслій В., Питель С. Статистичний аналіз географічної структури прямих іноземних інвестицій в Україну. *Вісник економіки*. 2021. № 2. С. 160–175. URL: <http://dspace.wunu.edu.ua/handle/316497/42589>
5. Нікітіна В., Шершенюк О., Курчата І., Попкова К., Христофорова О. Управління інвестиційними проектами як важлива складова менеджменту підприємства у глобальному просторі. *Financial and Credit Activity Problems of Theory and Practice*. 2021. № 2(33). С. 473–481. DOI: <https://doi.org/10.18371/fcaptp.v2i33.207210>
6. Подковаліхіна О. О., Логвіненко В. О., Бахрушин В. Є. Задача розподілу інвестицій в умовах статистичної невизначеності. *Системні технології*. 2019. Том 2, № 121. С. 56–63. URL: <https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st/article/view/460>
7. Пурій Г. М. Сучасний стан та основні тенденції залучення прямих іноземних інвестицій в економіку України. *Інфраструктура ринку*. 2020. № 44. С. 199–203. DOI: <https://doi.org/10.32843/infrastructure44-33>
8. Тимоць М. В., Стахів Г. І. Фінансові аспекти залучення іноземних інвестицій в умовах воєнного стану. *Економіка та суспільство*. 2023. № 47. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-47-70>
9. Benuzzi M., Ploner M. Skewness-seeking behavior and financial investments. *Ann Finance*. 2024. № 20. P. 129–165. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10436-023-00437-y>
10. Berton F., Colombo M. G., Quas A. The changing patterns of venture capital investments in Europe. *Journal of Industrial and Business Economics*. 2019. № 46. P. 229–250. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40812-019-00113-1>
11. Bondemark A., Andersson H., Brundell-Freij K. Public preferences for distribution in the context of transport investments. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2022. № 157. P. 160–184. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2022.01.013>
12. Govaerts N., Bruninx K., Le Cadre H., Delarue Er. Forward-looking distribution network charges considering lumpy investments. *Journal of Regulatory Economics*. 2021. № 59. P. 280–302. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11149-021-09428-1>
13. Jongok K., Munsoo Ch. An Analysis on the Effect of Intangible Asset Investments on the Valuation of Distribution Companies. *J. Channel Retail*. 2021. № 26(1). P. 25–46. DOI: <https://doi.org/10.17657/jcr.2021.01.31.2>
14. Lausberg C., Lee S., Müller M. et al. Risk measures for direct real estate investments with non-normal or unknown return distributions. *Z Immobilienökonomie*. 2020. № 6. P. 3–27. DOI: <https://doi.org/10.1365/s41056-019-00028-x>
15. Montoya O. D., Grisales-Noreña L. F., Perea-Moreno A. P. Optimal Investments in PV Sources for Grid-Connected Distribution Networks: An Application of the Discrete-Continuous Genetic Algorithm. *Sustainability*. 2021. № 13(24). DOI: <https://doi.org/10.3390/su132413633>
16. Pereira G., da Silva P., Cerqueira P. Electricity distribution incumbents' adaptation toward decarbonized and smarter grids: Evidence on the role market, regulatory, investment, and firm-level factors. *Energy Policy*. 2020. № 142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111477>
17. Pretico G., Marinopoulos A., Vitiello S. Guiding electricity distribution system investments to improve service quality: A European study. *Utilities Policy*. 2022. № 77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jup.2022.101381>

УДК 004.8

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.25>

Ігор ШЕЛЕХОВ

кандидат технічних наук, доцент кафедри кібернетики та інформатики,
Сумський національний аграрний університет, i.shelehov@cs.sumdu.edu.ua
ORCID: 0000-0003-4304-7768

Дмитро ПРИЛЕПА

кандидат технічних наук, асистент кафедри комп'ютерних наук,
Сумський державний університет, d.prylepa@cs.sumdu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-4022-5496

Владислав АВЛАСОВИЧ

аспірант кафедри комп'ютерних наук,
Сумський державний університет, avlasovychwork@gmail.com

Олексій КОЛІСНИК

аспірант кафедри комп'ютерних наук,
Сумський державний університет, mrkolisnyk13@gmail.com

**МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ПРОЄКТУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ІЄРАРХІЧНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ
В ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ**

Анотація. У статті розглянуто розробку інтелектуальної ієрархічної системи керування хіміко-технологічним процесом на основі інформаційно-екстремальної інтелектуальної технології (ІЕІТ). Описано процес створення математичної моделі та алгоритмів побудови ієрархічних класифікаторів, що дозволяють покращити ефективність управління складними хіміко-технологічними процесами на підприємствах. Підходи до оптимізації системи, засновані на функціонально-статистичних випробуваннях, а також методи навчання й адаптації класифікаторів у процесі експлуатації, дозволяють створити гнучку і адаптивну систему, яка може ефективно реагувати на зміни умови технологічного процесу.

Метою роботи є покращення технологічного керування та автоматизація процесів на хімічних підприємствах через впровадження інтелектуальних систем з елементами машинного навчання.

Методологія дослідження включає використання математичних моделей та алгоритмів, що забезпечують точне налаштування й контроль параметрів технологічних процесів, а також тестування ефективності запропонованої системи на реальних даних. При цьому перспективним напрямком їх подальшого розвитку є впровадження ієрархічних класифікаторів, що зарекомендували себе ефективним засобом підвищення достовірності рішень щодо визначення функціонального стану процесів різної природи.

Наукова новизна роботи полягає в застосуванні ієрархічних моделей та методів інформаційно-екстремальної інтелектуальної технології проектування автоматизованих, здатних до машинного навчання систем керування. Згідно з розрахунками, використання такого підходу дозволить забезпечити функціональну ефективність керування виробничими процесами в режимі реального часу.

Ключові слова: інтелектуальна система керування, інформаційно-екстремальна інтелектуальна технологія, навчальна матриця, критерій функціональної ефективності, ієрархія, хіміко-технологічний процес.

Ihor SHELEHOV, Dmytro PRYLEPA, Vladyslav AVLASOVYCH, Olexsii KOLISNYK. MODELS AND METHODS FOR DESIGNING INTELLIGENT HIERARCHICAL CONTROL SYSTEMS IN CHEMICAL ENGINEERING PROCESSES

Abstract. The article examines the development of an intelligent hierarchical control system for chemical-technological processes based on the information-extreme intelligent technology (IEIT). It describes the process of creating a mathematical model and algorithms for constructing hierarchical classifiers, which enhance the efficiency of managing complex chemical-technological processes at industrial enterprises. The approaches to system optimization, grounded in functional-statistical testing, along with the methods for training and adapting classifiers during operation, enable the creation of a flexible and adaptive system capable of effectively responding to changing conditions within the technological process.

The aim of the work is to improve technological control and process automation at chemical enterprises through the implementation of intelligent systems incorporating elements of machine learning.

The research methodology involves the use of mathematical models and algorithms that ensure precise tuning and control of technological process parameters, as well as the evaluation of the proposed system's effectiveness using real-world data. A promising direction for further development lies in the implementation of hierarchical classifiers, which have proven to be an effective means of enhancing the reliability of decisions related to the assessment of the functional state of processes of various natures.

The scientific novelty of this work lies in the application of hierarchical models and methods of information-extreme intelligent technology for the design of automated, machine learning-capable control systems. According to the calculations, the use of this approach enables functional efficiency in managing production processes in real-time.

Key words: intelligent control system, information-extremal intelligent technology, training matrix, criterion of functional efficiency, hierarchy, chemical and technological process.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток хіміко-технологічних процесів потребує впровадження ефективних і гнучких систем керування, здатних адаптуватися до різноманітних умов виробництва. Оскільки ці процеси часто характеризуються високою складністю та множинними змінними, важливу роль відіграють системи автоматизації та інтелектуального керування, що забезпечують не лише точність, а й стабільність процесу. Зокрема, в умовах виробництва складних мінеральних добрив необхідно забезпечити контроль і оптимізацію параметрів технологічних процесів для досягнення високої якості продукції та зниження енергетичних та сировинних витрат.

Розробка ієрархічних систем керування, здатних до машинного навчання, є перспективним напрямом у автоматизації хіміко-технологічних процесів. Це дозволяє враховувати динамічні зміни в технологічному процесі та коригувати параметри в реальному часі, що значно підвищує ефективність систем. Проте, незважаючи на численні досягнення в цій галузі, залишається низка відкритих питань щодо моделювання та оптимізації таких систем, що потребує подальших досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження в галузі автоматизованих систем керування хіміко-технологічними процесами зосереджені на інтеграції новітніх технологій штучного інтелекту та інтелектуальних систем, які здатні адаптуватися до змінних умов виробництва [5, 7, 11]. Важливими напрямками є розробка математичних моделей навчання та екзамени, що дозволяють оптимізувати параметри керування на основі великих даних, отриманих від сенсорів та датчиків, що контролюють хіміко-технологічні параметри.

Зокрема, в праці [10] висвітлюються підходи до створення інтелектуальних класифікаторів для хіміко-технологічних процесів, які можуть автоматично коригувати керуючі параметри у відповідь на зміну вхідних умов. Інші дослідження [6, 8] фокусуються на застосуванні інформаційно-екстремальних технологій для оптимізації енергоспоживання в процесах виробництва складних добрив, що дозволяє зменшити витрати енергії та підвищити стабільність виробничих циклів.

Проблеми, пов'язані з відсутністю уніфікованих підходів до інтеграції інтелектуальних класифікаторів у системи автоматизації хіміко-технологічних процесів, досліджуються в працях [13] та [9]. Це дозволяє впроваджувати гнучкі системи, які можуть адаптуватися до змін умов та ефективно працювати з різними технологічними процесами.

Таким чином, розвиток інтелектуальних систем для автоматизації хіміко-технологічних процесів є актуальним та важливим напрямом, що потребує подальшого дослідження та впровадження новітніх математичних моделей та методів підвищення функціональної ефективності даних систем.

Матеріал і результати досліджень. Основна ідея методів інформаційно-екстремального машинного навчання в автоматизованих системах керування хіміко-технологічними процесами полягає в адаптації вхідного математичного опису системи для максимізації ймовірності точного розпізнавання та класифікації об'єктів і станів процесу. Це надзвичайно важливо в хіміко-технологічних процесах, де параметри процесу (температура, тиск, рівень) можуть змінюватися дуже швидко, що ускладнює точне відстеження та коригування параметрів у реальному часі.

Процес встановлення відповідності між даними, що надходять з різних сенсорів, та станами на технологічному обладнанні чутливий до кількості класів розпізнавання, таких як рівень тиску, температура, чи витрати. В рамках ІЕІ-технології розглядається геометричне представлення простору ознак, де в процесі машинного навчання формуються контейнери класів розпізнавання, які залишаються інваріантними до змін, що виникають внаслідок варіацій технологічних параметрів [2, 4].

Розглянемо задачу застосування інформаційно-екстремальних методів машинного навчання для побудови інтелектуальної системи керування хіміко-технологічними процесами, здатної виконувати класифікацію та аналіз на основі отриманих даних від сенсорних систем.

Нехай задано алфавіт діагностичних класів $\{X_m^o | m = 1, M\}$, який сформований на основі основних функціональних станів системи керування хіміко-технологічним процесом. Особливості автоматизованого керування, що включає постійний моніторинг основних технологічних параметрів, дозволяють використовувати дані датчиків для формування навчальної матриці $\|y_{m,i}^{(j)} | i = 1, N; j = 1, n\|$. У цьому випадку кожен рядок матриці $\{y_{m,i}^{(j)} | i = 1, N\}$ відповідає j -ій реалізації, а стовпчик $\{y_{m,i}^{(j)} | j = 1, n\}$ – навчальній вибірці для i -ї діагностичної ознаки.

Згідно з концепцією ІЕІ-технології вхідна навчальна матриця в ході глибокого машинного навчання трансформується у множину вирішальних правил, параметри яких оптимізуються (в інформаційному сенсі) шляхом максимізації функціональної ефективності ієрархічної системи. При цьому глибина навчання передбачає два рівні: на першому – оптимізацію фенотипних параметрів (геометричних характеристик гіперсферичних контейнерів функціональних станів), а на другому – генотипних параметрів, тобто системи контрольних допусків на ознаки розпізнавання. У результаті структурований вектор параметрів, що впливають на функціональну ефективність глибокого навчання, має вигляд:

$$g^{(h,s)} = \langle \{x_{0,i}^{(h,s)}\}, d_0^{(h,s)}, \{x_{1,i}^{(h,s)}\}, d_1^{(h,s)}, \{\delta_{K,i}^{(h,s)}\} \rangle \quad (1)$$

де $x_{0,i}^{(h,s)}$ – усереднений вектор ознак базового стану хіміко-технологічного процесу $x_0^{(h,s)}$ на h -му ярусі s -й страті ієрархічного дерева; $x_{1,i}^{(h,s)}$ – усереднений вектор ознак найближчого до базового функціонального стану $x_1^{(h,s)}$ на h -му ярусі s -й страті; $d_0^{(h,s)}$ – радіусом гіперсферичного контейнера базового функціонального стану $x_0^{(h,s)}$; $d_1^{(h,s)}$ – радіус гіперсферичного контейнера найближчого до базового функціонального стану $x_1^{(h,s)}$; K – множина кроків машинного навчання; $\delta_{K,i}^{(h,s)}$ – параметром, який дорівнює половині контрольного поля допусків на ознаки функціональних станів h -го ярусу s -ої страти.

У процесі машинного навчання системи керування хіміко-технологічним процесом необхідно оптимізувати параметри вектора (1) для кожної страти ієрархічної структури функціональних станів:

$$E^{(h,s)} = \frac{\max_{G_E \cap G_{d_0^{(h,s)}}} E_0^{(h,s)}(d_0^{(h,s)}) + \max_{G_E \cap G_{d_1^{(h,s)}}} E_1^{(h,s)}(d_1^{(h,s)})}{2} \quad (2)$$

На основі отриманих у ході навчання оптимальних геометричних параметрів контейнерів реалізації станів, слід побудувати для кожної страти відповідні вирішальні правила, які забезпечують високу достовірність прийняття рішень про поточний стан процесу. На етапі екзамєну система повинна класифікувати структурований вектор значень технологічних ознак, віднісши його до одного з класів сформованого алфавіту фінальної страти.

Таким чином, задача інформаційно-екстремального синтезу здатної до навчання системи полягає в оптимізації параметрів навчання шляхом наближення глобального максимуму інформаційного критерію (2) до його граничного значення.

На рисунку 1 зображено функціональну категорійну модель інформаційно-екстремального машинного навчання системи керування хіміко-технологічними процесами з оптимізацією параметрів моделі.

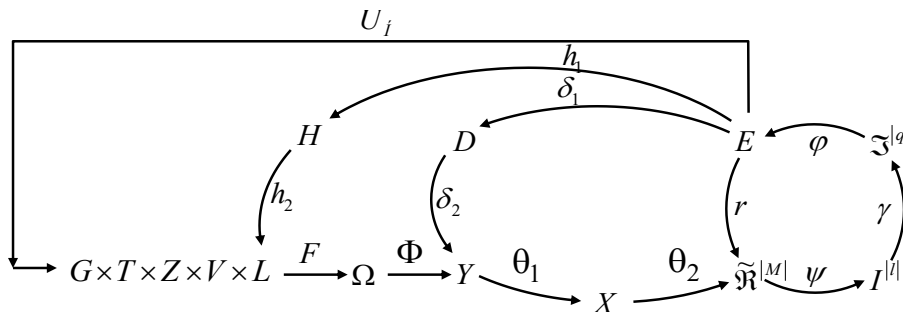


Рис. 1. Модель машинного навчання з оптимізацією геометричних параметрів контейнерів класів розпізнавання [4]

Така модель включає кілька основних контурів:

- контур оптимізації геометричних параметрів $\boxed{\psi \rightarrow \gamma \rightarrow \phi \rightarrow r}$;
- контур оптимізації системи контрольних допусків (СКД) на ознаки розпізнавання $\theta_1 \rightarrow \theta_2 \rightarrow \psi \rightarrow \gamma \rightarrow \phi \rightarrow r \rightarrow \delta_1 \rightarrow \delta_2$;
- контур оптимізації параметрів ієрархічної структури вирішальних правил $F \rightarrow \Phi \rightarrow \theta_1 \rightarrow \theta_2 \rightarrow \psi \rightarrow \gamma \rightarrow \phi \rightarrow r \rightarrow \delta_1 \rightarrow \delta_2 \rightarrow h_1 \rightarrow h_2$.

У функціональній категорійній моделі, представлений на рис. 1, застосовано наступні позначення [3]: G – простір вхідних сигналів (факторів); T – множина моментів часу зняття інформації; Ω – простір ознак розпізнавання; Z – простір можливих станів; L – ієрархічна структура класифікатору, що

формується; Y – множина сигналів після первинної обробки інформації; X – множина сигналів в бінарному просторі ознак розпізнавання; $\mathfrak{R}^{|M|}$ – множина вирішальних правил; $I^{|I|}$ – множина статистичних гіпотез про належність реалізацій до певного класу; %%% – множина точнісних характеристик; E – множину значень інформаційного КФЕ; D – терм-множина СКД; L – терм-множина ієрархічних структур класифікатору.

Оцінка функціональної ефективності системи здійснюється за допомогою логарифмічної інформаційної статистичної міри Кульбака [2-4].

$$E_m^{(k)} = 0,5 \log_2 \left(\frac{D_1^{(k)} + D_2^{(k)}}{\alpha^{(k)} + \beta^{(k)}} \right) \left[(D_1^{(k)} + D_2^{(k)}) - (\alpha^{(k)} + \beta^{(k)}) \right] = \log_2 \left(\frac{2 - (\alpha^{(k)} + \beta^{(k)})}{\alpha^{(k)} + \beta^{(k)}} \right) \left[1 - (\alpha^{(k)} + \beta^{(k)}) \right], \quad (3)$$

де $D_1^{(k)}$ – перша достовірність, обчислена на k -му кроці навчання; $D_2^{(k)}$ – друга достовірність; $\alpha^{(k)}$ – помилка першого роду; $\beta^{(k)}$ – помилка другого роду.

Результати. Реалізація алгоритму інтелектуальної ієрархічної системи керування хіміко-технологічним процесом здійснювалася за вхідною навчальною матрицею, яка містила десять класів розпізнавання. Алфавіт класів включав базовий клас і дев'ять додаткових класів, які відображали різні відхилення від заданих норм по хімічному складу та якості продукту. Тут X_0^o – базовий клас, що відповідає функціональному стану автоматизованої системи керування технологічним процесом, який забезпечує виробництво продукту NPK з заданими хімічним складом і показниками гранульованості; X_1^o – середнє відхилення по вмісту азоту; X_2^o – середнє відхилення по вмісту фосфору; X_3^o – середнє відхилення по вмісту калію; X_4^o – незначне відхилення по вмісту азоту; X_5^o – високе відхилення по вмісту азоту; X_6^o – незначне відхилення по вмісту фосфору; X_7^o – високе відхилення по вмісту фосфору; X_8^o – незначне відхилення по вмісту калію; X_9^o – високе відхилення по вмісту калію.

Структурована реалізація функціонального стану технологічного процесу включала 55 ознак розпізнавання, з яких 12 ознак відповідали результатам хімічного аналізу (вхідний та міжопераційний контроль), а решта – значення параметрів, зібраних датчиками, таких як температура, рівень, витрата, рН, а також електричні параметри технологічного обладнання.

Для формування початкового алфавіту класів розпізнавання сформовано лінійний класифікатор. При цьому використовувалися методи паралельної оптимізації контрольних допусків (рис. 2) та налаштування геометричних параметрів розділових правил (рис. 3). Графік побудовано на основі інформаційно-екстремального машинного навчання для системи керування хіміко-технологічним процесом. Заштрихована ділянка графіка позначає робочу область, де перші та другі достовірності перевищують відповідно помилки першого та другого роду [1, 12].

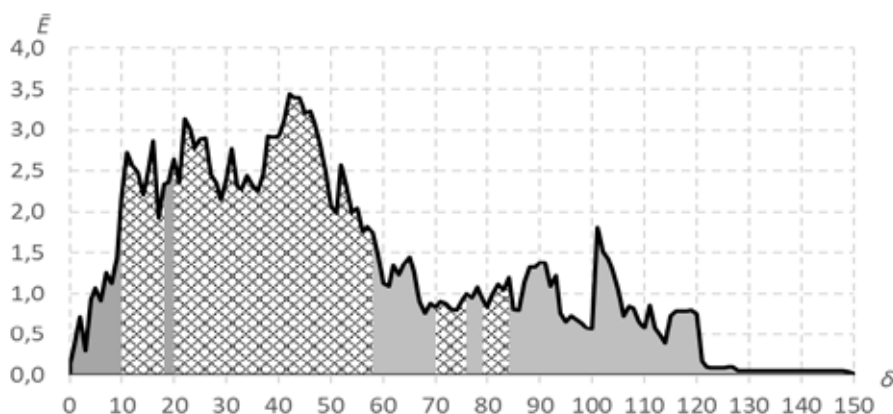


Рис. 2. Графік залежності середнього значення критерію функціональної ефективності (КФЕ) від параметру СКД

Аналіз рисунка 2 показує, що найвище значення середнього критерію функціональної ефективності було досягнуто на 42-му кроці і становило $\bar{E} = 3,44$, що забезпечує чітке відокремлення між різними класами розпізнавання.

На рисунку 3 наведено результати оптимізації геометричних параметрів контейнерів класів X_1^o , X_2^o , X_3^o , X_4^o .

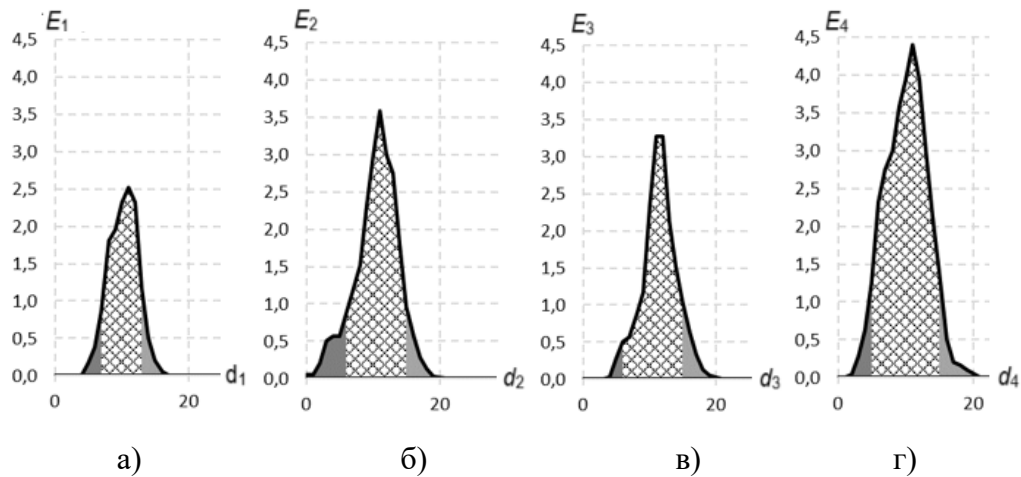


Рис. 3. Графіки залежності КФЕ (3) від радіусів контейнерів класів розпізнавання:
а – клас X_1^o , б – клас X_2^o , в – клас X_3^o , г – клас X_4^o

Аналіз результатів (рис. 3) показує, що найбільше значення КФЕ для контейнера класу $X_1^o = 2.52$ відповідає радіусу 11, найбільше значення КФЕ для контейнера класу $X_2^o = 3.58$ відповідає радіусу 11, найбільше значення КФЕ для контейнера класу $X_3^o = 3.27$ відповідає радіусу 11, та найбільше значення КФЕ для контейнера класу $X_4^o = 4.39$ відповідає радіусу 11. Аналіз точнісних характеристик класу X_1^o – $D_1 = 0.93$, $\beta = 0.08$, для класу X_2^o – $D_1 = 0.97$, $\beta = 0.03$, для класу X_3^o – $D_1 = 0.97$, $\beta = 0.00$, та для класу X_4^o – $D_1 = 1$, $\beta = 0$, що підтверджує, те що класифікатор не є безпомилковим.

Для підвищення функціональної ефективності системи було реалізовано ієрархічну структуру вирішальних правил, після чого проведено перенавчання системи. У процесі перенавчання використовувалися алгоритми паралельної оптимізації СКД (рис. 4) та геометричних параметрів контейнерів функціональних станів (рис. 5).

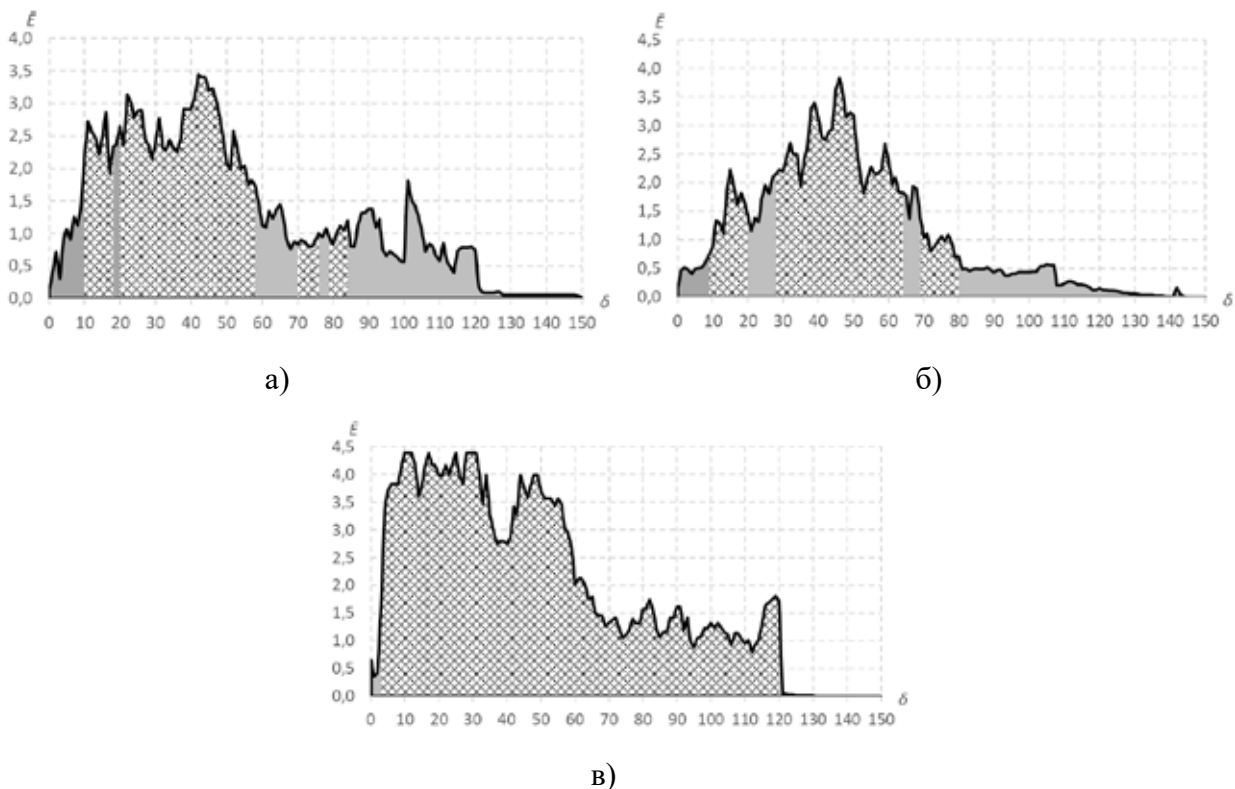


Рис. 4. Графік залежності усередненого КФЕ від ширини поля допусків
а) перший, б) другий, в) третій рівень ієрархії

Аналіз рис. 4 свідчить, що на першому рівні ієрархії максимальне значення усередненого КФЕ досягнуто на 42-му кроці та становило 3.44; на другому рівні – на 46-му кроці зі значенням 3.84; аналогічне значення було зафіксовано і для третього рівня також на 46-му кроці. Результати оптимізації геометричних параметрів контейнерів функціональних станів для відповідної СКД наведено на рис. 5.

Аналіз результатів (рис. 5) показує, що на першому рівні ієрархії найбільше значення КФЕ для контейнера класу $X_4^o=4.39$ відповідає радіусу 11, для другого рівня ієрархії найбільше значення КФЕ для контейнера класу $X_1^o=4.39$ відповідає радіусу 13, для третього рівня ієрархії найбільше значення КФЕ для контейнера класу $X_2^o=4.39$ відповідає радіусу 8, та для четвертого рівня ієрархії найбільше значення КФЕ для контейнера класу $X_3^o=4.39$ відповідає радіусу 10. Аналіз точнісних характеристик для класів X_1^o , X_2^o , X_3^o , та X_4^o , де $D_1 = 1$ і $\beta = 0$ для всіх класів, підтверджує, те що класифікатор є безпомилковим.

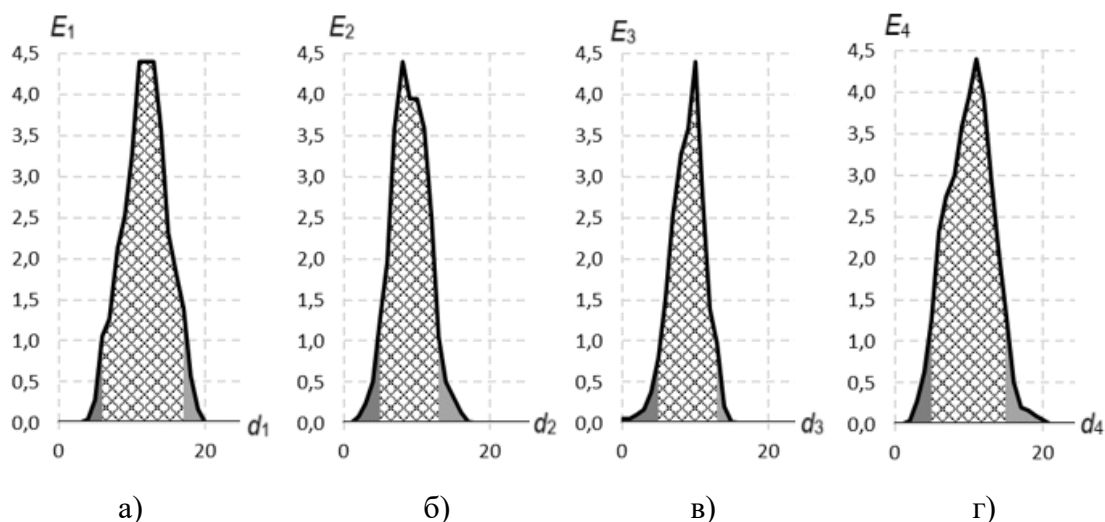


Рис. 5. Графіки залежності КФЕ (3) від радіусів контейнерів класів розпізнавання:
а – клас X_1^o , б – клас X_2^o , в – клас X_3^o , г – клас X_4^o

Таким чином, побудовані класифікатори забезпечують повну коректність класифікації за навчальною матрицею, а перевага ієрархічних класифікаторів над лінійними в рамках ІЕІ-технології підтверджена результатами моделювання.

Висновки. Запропоновано метод інформаційно-екстремального машинного навчання для інтелектуальної ієрархічної системи керування хіміко-технологічними процесами, який використовує оптимізацію параметрів розпізнавання функціональних станів технологічних процесів. Це дозволило суттєво підвищити функціональну ефективність системи керування за рахунок покращення точності розпізнавання та класифікації станів процесу на основі даних з сенсорів і датчиків.

У ході дослідження були оптимізовані параметри класифікації об'єктів технологічного процесу, що дозволило забезпечити високу точність і швидкість прийняття управлінських рішень в режимі реального часу, навіть в умовах змінних характеристик процесу. Впровадження ієрархічних класифікаторів дозволило підвищити стійкість системи до змін вхідних умов, що є критичним для складних хіміко-технологічних процесів.

Для забезпечення безпомилкових класифікацій і прийняття рішень у складних умовах виробництва, необхідне подальше вдосконалення системи, що включає оптимізацію додаткових параметрів, таких як налаштування вхідних даних та алгоритмів навчання для обробки складніших сценаріїв і підвищення адаптивності до динамічних змін технологічних умов.

Список використаних джерел:

1. Бібик М. В., Довбиш А. С. Оптимізація контрольних допусків на ознаки розпізнавання під час машинного навчання. *Журнал інженерних наук*. 2017. т. 4. № 1. с. Н1–Н6.
2. Довбиш А. С., Васильєв А. В., Любчак В. О. Інтелектуальні інформаційні технології в електронному навчанні: монографія. Суми: СумДУ. 2013. 177 с.
3. Прилепа Д. В. Інформаційно-екстремальна інтелектуальна технологія діагностування емоційно-психічного стану людини : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Прилепа Дмитро Вікторович. Харків, 2024. 188 с.
4. Москаленко В. В., Довбиш А. С. Вступ до інформаційного аналізу і синтезу інфокомунікаційних систем (Навчальний посібник). Суми: СумДУ. 2016. 226 с.

5. Bloor M., Ahmed A., Kotecha N., Mercangöz M., Tsay C., & del Río-Chanona E. A. Control-Informed Reinforcement Learning for Chemical Processes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2025. № 64(9). 4966–4978. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c03233>.
6. Geng Z., Yang X., Han Y., Zhu Q. Energy optimization and analysis modeling based on extreme learning machine integrated index decomposition analysis: Application to complex chemical processes. *Energy*. 2017. № 120. P. 67–78. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.12.090>.
7. Himmel A., Matschke J., Kok R., Morabito B., Nguyen H.H., & Findeisen R. Machine Learning for Process Control of (Bio)Chemical Processes. *Electrical Engineering and Systems Science*. 2023. arXiv:2301.06073 [eess.SY]. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.06073>.
8. Lawrence N. P., Damarla S. K., Kim J. W., Tulsyan A., Amjad F., Wang K., Chachuat B., Lee J. M., Huang B., Bhushan Gopaluni R. Machine learning for industrial sensing and control: A survey and practical perspective. *Control Engineering Practice*. 2024. № 145. 105841. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2024.105841>.
9. Lv F., Yang B., Yu S., Zou S., Wang X., Zhao J., Wen C. A unified model integrating Granger causality-based causal discovery and fault diagnosis in chemical processes. *Computers & Chemical Engineering*. 2025. 196. 109028. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2025.109028>.
10. Mitrai I., Daoutidis P. Accelerating process control and optimization via machine learning: A review. *Electrical Engineering and Systems Science*. 2024. arXiv:2412.18529 [eess.SY]. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.18529>.
11. Simkoff J. M., Lejarza F., Kelley M. T., Tsay C., Baldea, M. Process control and energy efficiency. *Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng.* 2020. № 11. 423–445. URL: DOI: 10.1146/annurev-chembioeng-092319-083227.
12. Shelehov I., Prylepa D., Khibovska Y. Information-Extreme Machine Learning of an Ophthalmic Diagnostic System with a Hierarchical Class Structure. *Artificial Intelligence*. 2024. № 3. pp. 114–125. URL: <https://doi.org/10.15407/jai2024.03.114>.
13. Wang X., Xue X., Chen K., Sun H., Liu X., Liu X., et al. Bidirectional Chemical Intelligent Net: A unified deep learning-based framework for predicting chemical reactions. 2024. July. URL: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4741807/v1>.

УДК 004.8:004.413.4

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.26>

Олександр ПСАРЬОВ

аспірант кафедри інформаційних технологій,
Сумський державний університет, aleksua18@gmail.com

ORCID: 0000-0003-2107-2751

ІНТЕГРАЦІЯ МЕТОДІВ ОЦІНКИ БЕЗПЕКИ ЗАГАЛЬНОГО ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ЦІЛЕСПРЯМОВАНУ МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Анотація. Предметом статті є комплексне дослідження та розробка підходів до інтеграції методів оцінки безпеки загального штучного інтелекту у процес управління ризиками при розробці програмного забезпечення. Особливу увагу приділено аналізу потенційних загроз, які виникають при використанні загального штучного інтелекту у сучасних програмних продуктах, а також розгляду методів мінімізації цих ризиків. У статті представлені практичні рішення, зокрема використання ієрархічного процесу аналізу для визначення пріоритетів ризиків та генетичних алгоритмів для пошуку оптимальних стратегій зниження ризиків.

Детально описані основні принципи застосування ієрархічного процесу аналізу у контексті управління ризиками програмного забезпечення, включаючи побудову ієрархій, оцінювання ризиків та формування матриці пріоритетів. Генетичні алгоритми використовуються для знаходження оптимальних рішень на основі даних ієрархічного процесу аналізу, що дозволяє забезпечити адаптивність і точність у створенні безпечного програмного забезпечення. Наведені приклади розрахунків демонструють, як об'єднання цих методів сприяє досягненню більш ефективного управління ризиками.

Метою статті є розробка інструментарію для оцінки та управління ризиками, пов'язаними з використанням загального штучного інтелекту у процесах розробки програмного забезпечення, а також забезпечення безпеки цих процесів шляхом інтеграції новітніх алгоритмічних рішень.

Висновки. Інтеграція ієрархічного процесу аналізу та генетичних алгоритмів дозволяє створити ефективну модель управління ризиками при розробці програмного забезпечення з використанням загального штучного інтелекту, що мінімізує загрози та забезпечує високу надійність систем.

Ключові слова: загальний штучний інтелект, управління ризиками, ієрархічний процес аналізу, генетичні алгоритми, мінімізація ризиків.

Oleksandr PSAROV. INTEGRATION OF GENERAL ARTIFICIAL INTELLIGENCE SAFETY ASSESSMENT METHODS INTO A TARGETED SOFTWARE DEVELOPMENT RISK MANAGEMENT MODEL

Abstract. The subject of this article is the comprehensive study and development of approaches to integrating General Artificial Intelligence safety assessment methods into the risk management process in software development. Particular attention is paid to analyzing potential threats that arise when using Artificial General Intelligence in modern software products and examining methods for minimizing these risks. The article presents practical solutions, including the use of the Analytical Hierarchy Process to prioritize risks and genetic algorithms to find optimal risk mitigation strategies.

The main principles of Analytical Hierarchy Process application in the context of software risk management are described in detail, including the construction of hierarchies, risk assessment, and priority matrix formation. Genetic algorithms are used to identify optimal solutions based on Analytical Hierarchy Process data, providing adaptability and precision in creating secure software. Calculation examples demonstrate how combining these methods contributes to more effective risk management.

The **aim** of the article is to develop tools for assessing and managing risks associated with the use of Artificial General Intelligence in software development processes and to ensure the safety of these processes by integrating advanced algorithmic solutions.

Conclusions. The integration of the Analytical Hierarchy Process and genetic algorithms enables the creation of an effective risk management model in software development involving Artificial General Intelligence, minimizing threats and ensuring high system reliability.

Key words: general artificial intelligence, risk management, Analytical Hierarchy Process, genetic algorithms, risk minimization.

Вступ. Сучасний розвиток інформаційних технологій створює для розробників програмного забезпечення (ПЗ) нові виклики: зростання складності проектів, жорсткі вимоги до якості, ефективності та безпеки. Ці труднощі пов'язані з масштабованістю проектів, розвитком штучного інтелекту (ШІ), застосуванням гнучких методологій, таких як Agile, та інтеграцією штучного загального інтелекту (AGI) [6, 2, 3, 9].

Попри переваги гнучких методологій (адаптивність, прозорість, залучення користувачів), вони супроводжуються високим рівнем невизначеності та людськими факторами, що збільшує ризики затримок, перевищення бюджету та невиконання цілей. Використання AGI також несе нові загрози: складність прогнозування поведінки, ризик етичних порушень, проблеми конфіденційності та кібербезпеки.

Інтеграція аналітико-ієрархічного процесу (АНР) та генетичних алгоритмів (GA) пропонує ефективний підхід до управління ризиками. АНР структуровано оцінює ризики, враховуючи приховані залежності, тоді як GA знаходить оптимальні стратегії їх пом'якшення [10, 8]. Модель адаптивно реагує на зміни та підвищує прозорість і ефективність управління ризиками, що особливо важливо для проектів із AGI.

Розробка такої моделі є вагомим науковим внеском, який відповідає викликам цифрової трансформації й відкриває нові можливості для вдосконалення управлінських стратегій.

Завдання дослідження спрямовані на розкриття ключових аспектів проблематики.

1. Провести аналіз потенційних загроз і ризиків, пов'язаних із використанням AGI у розробці програмного забезпечення.
2. Розробити методику інтеграції АНР для визначення пріоритетів ризиків у контексті безпеки AGI.
3. Вивчити можливості використання генетичних алгоритмів для оптимізації стратегій управління ризиками у ПЗ.
4. Запропонувати комбіновану модель, що інтегрує АНР та генетичні алгоритми для забезпечення адаптивного управління ризиками.
5. Виконати емпіричне моделювання та оцінити ефективність запропонованої моделі на основі практичних прикладів.

Методологія та наукова новизна. Дане дослідження спрямоване на вирішення актуальної проблеми управління ризиками у процесі розробки ПЗ, особливо в умовах інтеграції AGI. **Методологія** базується на використанні комбінованого підходу, що включає кількісні та якісні методи оцінки ризиків, які об'єднуються в єдину цілеспрямовану модель управління ризиками (ЦМУРПЗ).

На першому етапі проведено аналіз проблематики, пов'язаної із сучасними викликами в розробці ПЗ, включаючи складність проектів, динамічний розвиток штучного інтелекту та ризики, що виникають на різних етапах життєвого циклу проектів. Ідентифіковано основні ризики, які можуть впливати на ефективність і безпеку ПЗ, зокрема ті, що мають мультиплікативний характер.

Другим етапом дослідження є застосування АНР для системної оцінки ризиків. Цей метод забезпечує структурованість у визначенні пріоритетів ризиків шляхом побудови ієрархій та використання експертних оцінок для створення матриці парних порівнянь. Пріоритизація дозволяє виділити ключові ризики для подальшого аналізу. Наступний етап передбачає використання GA для оптимізації управління ризиками.

Наукова новизна дослідження полягає у створенні адаптивної цілеспрямованої моделі управління ризиками, яка інтегрує АНР та GA. Вперше запропоновано методику об'єднання цих інструментів для системного підходу до управління ризиками у розробці ПЗ. Інтеграція дозволяє не лише оцінювати прямі ризики, але й враховувати приховані залежності, що значно підвищує ефективність управління. Застосування генетичних алгоритмів у поєднанні з вагами, визначеними за допомогою АНР, дозволяє знаходити оптимальні рішення у складних багатокритеріальних задачах.

Дослідження має значний науковий внесок, адже вперше у сфері управління ризиками інтегровано АНР та GA, що забезпечує новий рівень адаптивності та ефективності управлінських стратегій. Це відкриває перспективи для подальших досліджень у галузі управління ризиками, розробки ПЗ та методології інтеграції новітніх технологій. Тема є надзвичайно актуальною як для наукової спільноти, так і для практиків у сфері ІТ, оскільки відповідає викликам сучасної цифрової трансформації.

Вступ до проблеми безпеки AGI у розробці програмного забезпечення. З розвитком AGI перед розробниками програмного забезпечення постають як нові можливості, так і численні виклики. З одного боку, AGI може пришвидшити процес розробки, оптимізувати роботу та вирішувати складні завдання. З іншого боку, існують ризики, пов'язані зі зменшенням креативної складової, втратою персональної відповідальності за код, етичними питаннями та проблемами щодо прав інтелектуальної власності. Розробники можуть зіткнутися зі складнощами у міждисциплінарній співпраці, зростаючим тиском через порівняння з ШІ, а також з ризиком дегуманізації процесу розробки, що може вплинути на інновації та унікальність програмних рішень [1]. Щоб зменшити ці загрози, важливо навчитися ефективно співпрацювати з ШІ як з інструментом, який доповнює людські здібності. Окрім того, важливо зберігати баланс між технічною оптимізацією та потребами користувачів, щоб уникнути втрати орієнтації на людину під час створення програмного забезпечення [7, 5].

Значущість інтеграції методів безпеки AGI у розробку ПЗ. Управління ризиками має обов'язково включати елементи безпеки AGI [4]. Ключові аспекти теми:

1. *Автономність AGI та ризики контролю.* AGI системи мають здатність до автономного навчання і прийняття рішень, що може призвести до непередбачуваних наслідків. Коли AGI діє без людського контролю, ризики, пов'язані з його використанням, можуть бути значними. AGI може розробити алгоритми, які можуть суперечити етичним нормам або призвести до шкоди.

Формула контролю безпеки AGI:

$$\text{Безпека AGI} = \text{Контроль} + \text{Моніторинг} + \text{Аудит}$$

Ця формула підкреслює необхідність інтеграції постійного контролю, моніторингу та аудиту систем AGI на всіх етапах їх розвитку.

2. *Етичні виклики та відповідальність.* AGI може приймати рішення, що впливають на людей і суспільство і це породжує етичні дилеми. Якщо AGI генерує код або алгоритми, які мають етичні наслідки, питання відповідальності можуть стати складними.

Оцінка ризиків у контексті етики:

$$\text{Етичні ризики} = \text{Ймовірність} \times \text{Вплив}$$

Розробники повинні проводити оцінку ризиків на етапі проектування і враховувати можливі наслідки рішень AGI.

3. *Кібербезпека та вразливості.* AGI може бути використаний для виявлення вразливостей у програмному забезпеченні, що збільшує ризик кіберзлочинів. Модель оцінки вразливостей:

$$\text{Вразливості} = \text{Загроза} \times \text{Вразливість} \times \text{Вплив}$$

Ця модель дає змогу оцінити, які системи і компоненти є найбільш вразливими і, відповідно, розробники завчасно можуть вжити відповідних заходів для їх захисту.

4. *Прозорість і контроль.* AGI може працювати як "чорна скринька", де рішення, які приймаються, важко зрозуміти. Це ускладнює аудит і тестування програмного забезпечення, підвищуючи ризики ненавмисних помилок.

Модель прозорості:

$$\text{Прозорість} = \text{Кількість зрозумілих рішень} \div \text{Загальна кількість рішень}$$

Використання цієї формули дозволяє вимірювати, наскільки прозорими є системи AGI, що у свою чергу вплине на довіру користувачів та якість ПЗ.

5. *Виклики в області інтелектуальної власності.* З AGI, яке може генерувати код, виникають питання щодо власності на цей код.

Формула власності на результати AGI:

$$\text{Правовласності} = \text{Власник} + \text{Користувач} + \text{Ліцензія}$$

Формула підкреслює необхідність чіткого визначення прав власності на результати AGI у контексті розробки програмного забезпечення.

6. *Регуляторні виклики.* Впровадження AGI у розробку ПЗ може вимагати дотримання нових регуляторних норм, які будуть розроблятися в міру поширення технології. Розробники повинні бути готові адаптуватися до нових вимог.

Модель регуляторного ризику:

$$\text{Регуляторний ризик} = \text{Невизначеність} \times \text{Складність норм}$$

7. *Психологічні аспекти та моральний вплив.* Використання AGI може призвести до змін у психологічному стані розробників, зокрема через тиск, пов'язаний із впровадженням нових технологій. Це може негативно вплинути на якість роботи та загальний стан команди.

Модель психологічного впливу:

$$\text{Психологічний вплив} = \text{Стрес} + \text{Невизначеність} - \text{Підтримка}$$

Ця формула підкреслює важливість забезпечення підтримки для розробників у процесі впровадження AGI.

Оцінка безпеки AGI з використанням АНР моделі. Оцінка безпеки AGI за допомогою методу АНР є важливою для того, щоб виявляти, структурувати та пріоритезувати ризики, пов'язані з безпекою. Цей процес дозволяє ефективно управляти ризиками та контролювати використання AGI на кожному етапі його життєвого циклу, забезпечуючи високий рівень захисту [10].

Застосування АНР для управління ризиками в розробці ПЗ. Метод АНР є потужним інструментом для управління ризиками в розробці ПЗ, оскільки він дозволяє приймати обґрунтовані рішення шляхом розбиття складної проблеми на підзадачі, оцінки їх відносної важливості та впорядкування ризиків. Застосування АНР в управлінні ризиками розробки ПЗ можна розбити на такі кроки:

1. **Визначення критеріїв ризиків:** На початковому етапі визначаються критерії, за якими буде оцінюватися кожен ризик. Це можуть бути: **ймовірність настання ризику** (probability) – наскільки часто може траплятися подія, пов'язана з ризиком; **серйозність впливу** (impact) – оцінка можливого негативного впливу на проект; **часовий вплив** (timing) – період, коли ризик може вплинути на проект; **ресурси для пом'якшення** (mitigation resources) – оцінка витрат на зменшення впливу ризику.

2. **Побудова ієрархії:** АНР передбачає розбиття проблеми на рівні. На першому рівні ієрархії розташовується основна мета, на другому – головні критерії ризиків, а на наступному – альтернативні дії або ризики, які потребують оцінки.

3. **Попарне порівняння ризиків:** Кожен ризик порівнюється з іншими з точки зору його відносної важливості за встановленими критеріями. Це дозволяє об'єктивно визначити, які ризики є найбільш значущими і вимагають негайної уваги.

4. **Розрахунок ваг та пріоритетів:** За результатами порівнянь розраховуються ваги ризиків, що дозволяє впорядкувати їх за важливістю. Цей процес виконується з урахуванням внеску кожного ризику в загальний рівень ризику проекту.

5. **Розробка плану дій:** На основі отриманих ваг ризиків розробляється план дій для пом'якшення впливу найважливіших ризиків. В результаті застосування АНР забезпечує структурований підхід до прийняття рішень, який дає змогу командам проекту зосередитися на найбільш критичних аспектах ризиків, оптимізувати використання ресурсів та ефективніше управляти ризиками.

Оцінка ризиків AGI: Як АНР може бути адаптований для оцінки ризиків AGI, інтегрованих у розробку ПЗ. Із зростанням ролі штучного загального інтелекту (AGI) в розробці ПЗ виникає потреба в нових підходах до управління ризиками, пов'язаними з AGI. Метод АНР може бути адаптований для оцінки ризиків, пов'язаних із впровадженням AGI, завдяки його здатності аналізувати багатовимірні ризики, які мають високий рівень невизначеності. Ключові кроки застосування АНР для оцінки ризиків AGI можуть включати:

1. **Визначення специфічних критеріїв ризиків AGI:** На відміну від традиційних ризиків ПЗ, AGI-ризики вимагають врахування додаткових критеріїв: **етичність** (ethical impact) – ризик порушення етичних стандартів, що може викликати негативну реакцію суспільства; **конфіденційність даних** (data privacy) – ризик порушення конфіденційності через збір та обробку великих обсягів даних; **залежність від AGI** (dependency risk) – ризик надмірної залежності від AGI, що може вплинути на прийняття рішень; **безпека** (security) – ризик неправомірного доступу або неконтрольованого використання технологій AGI; **економічні наслідки** (economic impact) – ризик втрат або непрямих витрат, пов'язаних з використанням AGI.

2. **Попарне порівняння AGI-ризиків:** АНР використовується для проведення попарних порівнянь між ризиками, що дозволяє визначити, який ризик має найбільший вплив на проект. Це особливо важливо в умовах швидких змін у сфері AGI.

3. **Оцінка ваг та пріоритетів:** Результати попарного порівняння використовуються для розрахунку вагових коефіцієнтів для кожного ризику AGI. Це дозволяє створити рейтинг ризиків, враховуючи їхній вплив на успішність проекту.

4. **Розробка стратегій пом'якшення AGI-ризиків:** На основі отриманих ваг визначаються конкретні дії для зменшення впливу ризиків AGI.

5. **Моніторинг та перегляд ризиків:** Це забезпечує актуальність оцінки ризиків та дозволяє уникати неочікуваних проблем.

Переваги адаптації АНР для AGI-ризиків: Метод АНР дозволяє структурувати аналіз ризиків AGI, даючи змогу команді проекту зосередитися на критичних аспектах, які можуть вплинути на безпеку, конфіденційність та етичність впровадження. Завдяки АНР забезпечується об'єктивність та ефективність управління AGI-ризиками.

Інтеграція АНР і генетичних алгоритмів в ЦМУРПЗ. Інтеграція методу АНР та GA у модель управління ризиками в розробці програмного забезпечення, орієнтованої на цілі, дозволяє об'єднати багатокритеріальну оцінку ризиків та оптимізацію управлінських стратегій. Це забезпечує структурований підхід до пріоритизації ризиків і визначення оптимальних стратегій зниження ризиків у відповідності до їхньої важливості та ресурсних обмежень.

Алгоритм інтеграції АНР і GA. Процес інтеграції АНР та GA складається з наступних кроків:

1. Визначення ваг ризиків за допомогою методу АНР.
2. Оптимізація стратегій управління ризиками з використанням генетичного алгоритму.
3. Використання інтегрованої функції пристосованості для визначення кінцевого набору оптимальних стратегій.

Етап 1: Визначення ваг ризиків за допомогою методу АНР. АНР дозволяє декомпонувати проблему управління ризиками на ієрархічні рівні, щоб визначити відносну важливість кожного ризику. Основним інструментом для цього є **матриця парних порівнянь**, яка допомагає визначити, наскільки один ризик є важливішим за інший.

Створення матриці парних порівнянь:

Припустимо, що є три ризики: R_1, R_2, R_3 . Для кожної пари ризиків створюється оцінка їхньої важливості на основі експертних даних.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ \frac{1}{3} & 1 & 2 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix},$$

де a_{ij} – це відносна важливість ризику R_i порівняно з R_j , яка визначається за шкалою від 1 до 9, де 1 означає рівну важливість, а 9 – значну важливість одного ризику над іншим.

Нормалізація матриці. Щоб визначити ваги кожного ризику, спочатку нормалізуємо матрицю шляхом ділення кожного елемента стовпця на суму елементів цього ж стовпця. Наприклад:

$$A_{norm} = \begin{bmatrix} 0.652 & 0.600 & 0.625 \\ 0.217 & 0.200 & 0.250 \\ 0.130 & 0.100 & 0.125 \end{bmatrix}$$

Обчислення ваги ризиків. Ваги кожного ризику ω_i обчислюються як середнє значення елементів у відповідному рядку нормалізованої матриці:

$$\omega_1 = \frac{0.652 + 0.600 + 0.625}{3} = 0.626$$

$$\omega_2 = \frac{0.217 + 0.200 + 0.250}{3} = 0.222$$

$$\omega_3 = \frac{0.130 + 0.100 + 0.125}{3} = 0.118$$

Таким чином, ваги ризиків будуть:

$$W = \begin{bmatrix} 0.626 \\ 0.222 \\ 0.118 \end{bmatrix}$$

Ці ваги відображають пріоритетність кожного ризику у загальній системі.

Перевірка узгодженості матриці. Для перевірки узгодженості парних порівнянь обчислюється індекс узгодженості (CI) і відношення узгодженості (CR):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

де λ_{max} – максимальне власне значення матриці, n – кількість ризиків. Якщо $CR < 0.1$, то матриця вважається узгодженою.

Етап 2: Оптимізація стратегій управління з використанням генетичних алгоритмів. Генетичний алгоритм використовується для оптимізації управлінських стратегій кожного ризику на основі їх ваг та обмежень. Основна задача GA – знайти оптимальну комбінацію стратегій, яка забезпечує максимальну ефективність управління ризиками за мінімальних ресурсів.

Алгоритм генетичного алгоритму

1. Ініціалізація популяції: Формується початкова популяція хромосом, де кожна хромосома представляє стратегію управління ризиками. Наприклад, $x = [0, 1, 1]$, де 0 означає уникнення ризику, а 1 – його прийняття.

2. Функція пристосованості: Кожна стратегія оцінюється за функцією:

$$F(x) = \sum_{i=1}^n (\omega_i \cdot E_i - C_i)$$

де:

- ω_i – вага ризику R_i ,
- E_i – очікувана ефективність стратегії для ризику R_i ,
- C_i – вартість реалізації для ризику R_i .

3. **Селекція:** Вибір хромосом з найвищими значеннями функції пристосованості для наступного покоління.

4. **Кросовер:** Обмін частинами між хромосомами для створення нових варіантів стратегій.

5. **Мутація:** Випадкова зміна в генах для уникнення локальних мінімумів.

6. **Завершення:** Процес повторюється, поки не буде досягнуто оптимального рішення або заданої кількості поколінь.

Етап 3: Об'єднана функція пристосованості для інтеграції АНР та ГА. Фінальна функція пристосованості поєднує значення ваг ризиків, отримані за допомогою АНР, та результати оптимізації ГА, що дозволяє досягти збалансованого управління ризиками. Формула для об'єднаної функції має вигляд:

$$Z = \alpha \sum_{i=1}^n \omega_i + (1 - \alpha) F(x),$$

де α – параметр, що визначає вагу впливу ваг ризиків на загальний результат,

$F(x)$ – функція пристосованості, обчислена за допомогою ГА.

Приклад: якщо $\alpha = 0.7$, то модель надає більше ваги пріоритизованим ризикам, а якщо $\alpha = 0.3$, модель більше орієнтована на оптимізацію стратегії.

Розрахунок оптимальної стратегії на основі об'єднаної моделі. Для демонстрації роботи інтегрованої моделі припустимо, що є три ризики з наступними вагами, ефективністю стратегій і витратами (табл. 1).

Таблиця 1

Три ризики з різними вагами, ефективністю стратегій і витратами

Ризик	ω_i	E_i	C_i
R_1	0.626	0.8	0.2
R_2	0.222	0.5	0.3
R_3	0.118	0.6	0.4

Функція пристосованості для кожної можливої стратегії (залежно від вибраних значень E_i і C_i) може бути обчислена за формулою:

$$F(x) = \sum_{i=1}^3 (\omega_i \cdot E_i - C_i) = (0.626 \times 0.8 - 0.2) + (0.222 \times 0.5 - 0.3) + (0.118 \times 0.6 - 0.4)$$

Результат дозволяє вибрати оптимальні стратегії для зниження ризиків з урахуванням їх ваги і вартості управління.

Обчислення прикладу для функції пристосованості та оптимального рішення. Щоб проілюструвати роботу об'єднаної моделі, розглянемо конкретний приклад з розрахунками функції пристосованості. Нехай для ризиків R_1 , R_2 і R_3 у нас є наступні дані:

- **Ваги ризиків** ω_i : отримані з АНР як $\omega_1 = 0.626$, $\omega_2 = 0.222$, $\omega_3 = 0.118$.
- **Очікувана ефективність стратегій** E_i : для різних стратегій управління (наприклад, уникнення, прийняття, зменшення ризику).

- **Вартість реалізації стратегій** C_i : відповідно до бюджету та ресурсних обмежень.

Задача полягає у визначенні оптимального набору стратегій, що мінімізує ризики і максимізує загальну ефективність.

Крок 1: Розрахунок функції пристосованості для кожного ризику

Функція пристосованості для кожного ризику враховує вагу ризику ω_i , ефективність управлінської стратегії E_i та вартість її реалізації C_i . Формула функції пристосованості для ризику R_i має вигляд:

$$F_i(x) = \omega_i \cdot E_i - C_i$$

Розрахуємо значення для кожного ризику, використовуючи таблицю (табл. 2):

Таблиця 2

Розрахунок значень для кожного ризику

Ризик	ω_i	E_i	C_i	$F_i(x) = \omega_i \cdot E_i - C_i$
R_1	0.626	0.8	0.2	0.3008
R_2	0.222	0.5	0.3	- 0.189
R_3	0.118	0.6	0.4	- 0.3293

Таким чином, значення функцій пристосованості для кожного ризику визначають, що ризик R_1 є найбільш придатним для зменшення, оскільки $F(x) = 0.3008$ є позитивним.

Крок 2: Використання інтегрованої функції пристосованості

Об'єднана функція пристосованості, що враховує важливість ризиків і їх ефективність, має вигляд:

$$Z = \alpha \sum_{i=1}^n \omega_i + (1 - \alpha) \sum_{i=1}^n F_i(x)$$

де α – параметр пріоритетності між вагою ризику та ефективністю управління.

Припустимо, що $\alpha = 0.7$, тоді для обчислення функції Z використовуємо формулу:

$$Z = 0.7 \times (\omega_1 + \omega_2 + \omega_3) + 0.3 \times (F_1(x) + F_2(x) + F_3(x))$$

Підставимо числові значення:

1. Сума ваги: $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 0.626 + 0.222 + 0.118 = 0.966$.

2. Сума значень функцій пристосованості: $F_1(x) + F_2(x) + F_3(x) = 0.3008 - 0.189 - 0.3292 = - 0.2174$.

Тоді значення об'єднаної функції пристосованості:

$$Z = 0.7 \times 0.966 + 0.3 \times (- 0.2174) = 0.6762 - 0.06522 = 0.61098$$

Це значення Z можна використовувати для порівняння з іншими варіантами стратегій або для оцінки досягнутого рівня оптимальності.

Побудова матриці рішень для генетичного алгоритму. Для подальшого використання у генетичному алгоритмі будується матриця рішень (табл. 3), де кожен рядок представляє окрему стратегію управління для кожного ризику, а стовпці – їх характеристики (вага ризику, ефективність стратегії, вартість реалізації).

Таблиця 3

Приклад матриці рішень

Ризик	Вага ω_i	Ефективність стратегії E_i	Вартість C_i
R_1	0.626	0.8	0.2
R_2	0.222	0.5	0.3
R_3	0.118	0.6	0.4

Ця матриця є початковою популяцією для генетичного алгоритму, який буде шукати оптимальне значення функції Z , використовуючи операції селекції, кросовера та мутації.

Приклад роботи генетичного алгоритму. Генетичний алгоритм буде здійснювати такі основні кроки, використовуючи матрицю рішень.

1. Селекція: Вибір стратегій з найбільшою пристосованістю. Наприклад, стратегія з ризиком R_1 буде обрана, оскільки її функція пристосованості $F_1(x) = 0.3008$ є найвищою.

2. Кросовер: Поєднання генів (характеристик стратегій) з високою пристосованістю, наприклад, поєднання стратегій для ризиків R_1 і R_2 може створити нову стратегічну комбінацію для зниження ризику R_3 .

3. Мутація: Зміна окремих параметрів для уникнення локальних мінімумів. Наприклад, замість вартості $C_i = 0.4$ для ризику R_3 , можна встановити $C_i = 0.35$ для перевірки альтернативних варіантів.

Після кількох поколінь алгоритм визначить оптимальну комбінацію стратегій для кожного ризику, яка мінімізує їх вплив на проект при заданих обмеженнях.

Висновки. Інтеграція методів безпеки AGI у розробку ПЗ є критично важливою для управління ризиками, пов'язаними з використанням цих технологій. Врахування етичних, правових, психологічних і технічних аспектів допоможе розробникам створювати безпечні та ефективні рішення. Використання

формул і моделей оцінки ризиків дозволить структурувати процеси управління та підвищити якість програмного забезпечення в умовах швидко змінюваного технологічного середовища.

Розроблений підхід дозволяє вирішити ключові завдання управління ризиками: пріоритизацію ризиків, оптимізацію управлінських стратегій, інтеграцію методів.

Вихідні дані, отримані за допомогою АНР, використовуються для пошуку оптимальних стратегій пом'якшення ризиків у багатокритеріальних задачах. Поєднання АНР та ГА дозволяє ефективно враховувати залежності між ризиками, адаптуючись до динамічних змін у середовищі розробки ПЗ.

Практична цінність розробленої моделі полягає у забезпеченні прозорості управління ризиками, зниженні витрат і підвищенні ймовірності досягнення проектних цілей.

Список використаних джерел:

1. Alshaikhi A., Khayyat M. An investigation into the impact of artificial intelligence on the future of project management. *2021 International Conference of Women in Data Science at Taif University (WiDSTaif)* : 30–31 March, 2021. P. 1–4. DOI: 10.1109/WiDSTaif52235.2021.9430234
2. Badmus O. F. Application of AI technology in program management. *Journal of engineering research and reports*. 2023. Vol. 25, Issue 8. P. 48–55. DOI: 10.9734/jerr/2023/v25i8958
3. Bahi A., Gharib J., Gahi Y. Integrating generative AI for advancing agile software development and mitigating project management challenges. *International journal of advanced computer science and applications*. 2024. Vol. 15, No. 3. P. 54–61. DOI: 10.14569/IJACSA.2024.0150306
4. Biswal A. Top 24 Artificial Intelligence Applications and Uses. *Simplilearn*. Jan 8, 2025. URL: <https://www.simplilearn.com/tutorials/artificial-intelligence-tutorial/artificial-intelligence-applications> (Last accessed: 09.01.2025).
5. Ivcevic Z., Grandinetti M. Artificial intelligence as a tool for creativity. *Journal of Creativity*. 2024. Volume 34, Issue 2. 100079. DOI: 10.1016/j.yjoc.2024.100079
6. Khan S., Adnan A., Iqbal N. Applications of Artificial Intelligence in Transportation. *2022 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)*, Prague, Czech Republic, 20–22 July 2022. pp. 1–6, DOI: 10.1109/ICECET55527.2022.9872928
7. Nenni M. E., De Felice F., De Luca C., Forcina A. How artificial intelligence will transform project management in the age of digitization: a systematic literature review. *Management Review Quarterly*. 2024. DOI: 10.1007/s11301-024-00418-z
8. Srivastava R. Applications of Artificial Intelligence in Medicine. *Exploratory Research and Hypothesis in Medicine*. 2024. Vol. 9, Issue 2. P. 138–146. DOI: 10.14218/ERHM.2023.00048
9. Taboada I., Daneshpajouh A., Toledo N., de Vass T. Artificial Intelligence Enabled Project Management: A Systematic Literature Review. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, Issue 8. 5014. DOI: 10.3390/app13085014
10. Types of AI Explained: From Narrow to Super AI. *Simplilearn*. Oct 11, 2024. URL: <https://www.simplilearn.com/tutorials/artificial-intelligence-tutorial/types-of-artificial-intelligence> (Last accessed: 09.01.2025).

УДК 004.6:316.346.2:378

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.27>**Світлана РЗАЄВА**кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук,
Київський столичний університет імені Бориса Грінченка, s.rzaieva@kubg.edu.ua
ORCID: 0000-0002-7589-2045**Дарина ЧЕРНИШОВА**асистент кафедри інженерії програмного забезпечення та кібербезпеки,
Державний торговельно-економічний університет, d.chernyshova@knu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-2914-8020**МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ГЕНДЕРНОЇ РІВНОСТІ
У ЗАКЛАДАХ ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Анотація. У сучасному світі питання гендерної рівності набуває все більшої значущості. Зокрема, у закладах вищої освіти гендерна рівність є фундаментальним аспектом, який впливає на якість освіти, мотивацію науково-педагогічних працівників, а також на загальний морально-психологічний клімат в установах. Одним із головних викликів, що постає перед сучасними університетами, є забезпечення рівних можливостей для всіх працівників незалежно від їхньої статі. Це включає рівний доступ до академічного та професійного розвитку, рівні умови праці, справедливе розподілення ресурсів та можливостей для кар'єрного росту.

Мета роботи розробка інформаційно-аналітичної системи моніторингу гендерної рівності (ІАСМГР) у закладах вищої освіти з використанням UML-діаграм, що дозволяє підвищити ефективність оцінки гендерної рівності серед професорсько-викладацького та наукового складу.

Методологія використання UML (Unified Modeling Language) для проектування структури та функціоналу ІАСМГР. Застосування методів формалізації та алгоритмізації для аналізу, рефакторингу та трансформації UML-діаграм. Визначення структурної складності системи через кількість класів, інтерфейсів та зв'язків. Візуалізація системних компонентів та визначення ключових класів (кандидат, вакансія, критерії відбору, тощо).

Наукова новизна запропоновано формальний підхід до проектування ІАСМГР з урахуванням гендерної нейтральності. Введено цільову функцію для оптимізації структури UML-діаграм класів. Визначено множину семантично еквівалентних трансформацій UML-діаграм з метою зменшення упередженості за гендерною ознакою. Обґрунтовано необхідність застосування програмного забезпечення для факторингу UML-діаграм у багатозадачних системах.

Ще одним важливим аспектом є вплив інформаційних технологій на процес управління гендерною рівністю. Зокрема, важливим інструментом у процесі розробки та впровадження таких систем є UML (Unified Modeling Language). Використання UML діаграм дозволяє створювати стандартизовані моделі, які легко зрозумілі всіма учасниками процесу розробки, що підвищує якість системи і знижує ризики помилок. Запровадження таких моделей важливо в умовах, коли система моніторингу гендерної рівності повинна бути інтегрована у загальну структуру управління університетом і повинна відповідати вимогам різних зацікавлених сторін.

Висновки. UML-діаграми є ефективним інструментом у проектуванні архітектури ІАСМГР. Необхідно акцентувати увагу на візуалізації аналітичної інформації щодо гендерної рівності. Перспективи досліджень полягають у масштабуванні системи для обробки великих обсягів даних, а також в адаптації ІАСМГР до змін у вимогах і потребах користувачів.

Ключові слова: гендерна рівність; інформаційно-аналітична система; моніторинг; UML діаграми.

**Svitlana RZAEVA, Daryna CHERNYSHOVA. MODELING OF AN INFORMATION AND ANALYTICAL SYSTEM
FOR MONITORING GENDER EQUALITY IN HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS**

Abstract. In the modern world, the issue of gender equality is becoming increasingly important. In particular, in higher education institutions, gender equality is a fundamental aspect that affects the quality of education, the motivation of scientific and pedagogical staff, as well as the general moral and psychological climate in institutions. One of the main challenges facing modern universities is to ensure equal opportunities for all employees regardless of their gender. This includes equal access to academic and professional development, equal working conditions, fair distribution of resources and opportunities for career growth.

Objective development of an information and analytical system for monitoring gender equality in higher education institutions using UML diagrams, which allows to increase the efficiency of gender equality assessment among the teaching and research staff.

Methodology use of uml (unified modeling language) for designing the structure and functionality of the iasmgm. Application of formalization and algorithmization methods to analyze, refactor and transform uml diagrams and determine the structural complexity of the system through the number of classes, interfaces and connections. Visualization of system components and identification of key classes (candidate, vacancy, selection criteria, etc.).

Scientific novelty a formal approach to the design of iasmgm with regard to gender neutrality is proposed. An objective function for optimizing the structure of uml-class diagrams is introduced. A set of semantically equivalent transformations of uml-diagrams is defined to reduce gender bias and the need to use software for factoring uml-diagrams in multi-institutional systems is substantiated.

The implementation of such systems is important not only for ensuring fairness and equal opportunities, but also for increasing the overall efficiency of higher education institutions. Studies show that gender inequality can lead to lower labor productivity, reduced employee engagement, increased stress and conflicts in the work environment. Universities that neglect gender equality issues risk losing competitiveness and high-quality personnel. Another important aspect is the impact of information technology on the process of managing gender equality. In particular, an important tool in the process of developing and implementing such systems is UML (Unified Modeling Language). The use of UML diagrams allows you to create standardized models that are easily understood by all participants in the development process, which increases the quality of the system and reduces the risk of errors. The implementation of such models is important in conditions where the gender equality monitoring system must be integrated into the overall university management structure and must meet the requirements of various stakeholders.

Conclusions *uml diagrams are an effective tool in the development of the iamgm architecture. It is necessary to focus on visualization of analytical information on gender equality. The research prospects are to scale the system to process large amounts of data, as well as to adapt the iamgm to changes in the requirements and needs of users.*

Key words: *gender equality; information and analytical system; monitoring; UML diagrams.*

Актуальність цієї статті зумовлена необхідністю створення ефективних механізмів для моніторингу та управління гендерною рівністю у вищих закладах освіти. У зв'язку з цим розробка інформаційно-аналітичних систем для моніторингу гендерної рівності стає надзвичайно важливою. Такі системи дозволяють збирати, обробляти та аналізувати дані щодо гендерного складу працівників освітніх установ, виявляти можливі проблеми і нерівності, а також розробляти стратегії для їх вирішення.

Впровадження таких систем є важливим не тільки для забезпечення справедливості та рівних можливостей, але й для підвищення загальної ефективності функціонування закладів вищої освіти. Дослідження показують, що гендерна нерівність може призводити до зниження продуктивності праці, зменшення залученості працівників, зростання рівня стресу та конфліктів у робочому середовищі. Університети, що нехтують питаннями гендерної рівності, ризикують втратити конкурентоспроможність та якісні кадри.

Ще одним важливим аспектом є вплив інформаційних технологій на процес управління гендерною рівністю. Зокрема, важливим інструментом у процесі розробки та впровадження таких систем є UML (Unified Modeling Language). Використання UML діаграм дозволяє створювати стандартизовані моделі, які легко зрозумілі всіма учасниками процесу розробки, що підвищує якість системи і знижує ризики помилок. Запровадження таких моделей важливо в умовах, коли система моніторингу гендерної рівності повинна бути інтегрована у загальну структуру управління університетом і повинна відповідати вимогам різних зацікавлених сторін.

Вступ. У сучасному суспільстві створення умов для гендерної рівності є ключовим фактором успішного розвитку будь-якої організації, особливо у царині вищої освіти. Університети, як центри впровадженнь інновацій, мають бути прикладом у реалізації принципу рівності серед професорсько-викладацького та наукового складу працівників. А це, в свою чергу, вимагає створення системи, яка могла б ефективно контролювати та оцінювати рівень гендерної рівності в усіх аспектах освітніх установ.

Важливими факторами успішного функціонування закладу вищої освіти є забезпечення рівних умов праці та можливостей професійного розвитку. Гендерна нерівність може призвести до негативних наслідків, таких як зниження продуктивності та мотивації працівників, що, у своїй ситуації, впливає на якість освіти. Тому важливо розробити та запровадити ефективну систему моніторингу гендерної рівності, яка допоможе оцінити та проаналізувати статус рівності співробітників університету. Сучасні інформаційно-аналітичні системи мають бути гнучкими, масштабованими та здатними забезпечувати точний та своєчасний аналіз даних про гендерну рівність.

Постановка проблеми. У сучасному світі необхідність забезпечення гендерної рівності є однією з найважливіших складових розвитку суспільства. Заклади вищої освіти є провідними центрами знань, науки та інновацій і повинні демонструвати принципи гендерної рівності по відношенню до професорсько-викладацького та наукового складу працівників. Однак, незважаючи на численні закони та ініціативи, спрямовані на зменшення гендерної нерівності, це все ще залишається проблемою для багатьох освітніх установ.

Питання гендерної нерівності в університетах можна виразити різними способами: відсутність рівного розподілу посад між чоловіками та жінками, різниця в зарплаті, відсутність можливостей для зростання та різниця в участі в дослідженнях. Це не тільки порушує принципи справедливості, але й негативно впливає на загальну ефективність роботи закладу, знижуючи мотивацію та задоволеність працівників своєю роботою.

Ефективне вирішення проблеми гендерної нерівності потребує системного підходу, який включає постійний моніторинг, аналіз та впровадження коригувальних заходів. Важливою складовою цього

процесу є створення інформаційно-аналітичних систем, які дозволяють збирати, обробляти та аналізувати дані про гендерну рівність у реальному часі. Такі системи повинні бути інтегровані у внутрішні процеси управління університетом і забезпечувати прозорість та об'єктивність прийняття рішень.

Інформаційно-аналітична система моніторингу гендерної рівності (ІАСМГР) серед професорсько-викладацького та наукового складу працівників університету призначена для аналізу рівності статей серед персоналу закладу вищої освіти, має вагому значимість у рамках сучасного академічного процесу. Дана система забезпечує збір та аналіз даних, візуалізацію отриманих результатів. Впровадження ІАСМГР створює сприятливе освітнє середовище, підвищує мотивацію та продуктивність працівників закладу вищої освіти, а також підвищує репутаційну цінність освітнього закладу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання гендерної рівності активно вивчається в багатьох країнах, що свідчить про його актуальність та важливість для суспільства. Дослідження охоплюють різні аспекти проблеми, зокрема соціальні, економічні, правові та управлінські. У контексті вищої освіти питання гендерної рівності найчастіше розглядаються з точки зору забезпечення рівних можливостей для академічного та професійного зростання.

Одним із важливих напрямів досліджень є вивчення впливу гендерної нерівності на діяльність закладів вищої освіти. Дослідження показують, що гендерна нерівність призводить до зниження продуктивності праці, погіршення морально-психологічного клімату та підвищення плинності кадрів. Дане твердження підтверджують дослідження таких авторів, як Андерсон [1] та Браун [2], які зазначають, що гендерна дискримінація негативно впливає на мотивацію та залученість працівників до проведення освітнього процесу.

Ще однією важливою темою є розробка та впровадження інформаційно-аналітичних систем для моніторингу гендерної рівності. Такі дослідники, як Сміт [3] та Джонсон [4], зазначають, що ефективні системи моніторингу повинні забезпечувати збір, обробку та аналіз даних щодо гендерної рівності в режимі реального часу. Це дасть змогу вчасно виявляти проблеми та вживати коригувальних заходів. Важливим аспектом є інтеграція таких систем у загальну структуру управління університетом та забезпечення їх ефективного використання.

Як свідчить аналіз літератури, одним з основних підходів до подолання гендерної нерівності є використання комплексної методології, яка поєднує різні інструменти та підходи. Наприклад, дослідження Грін [5] показує, що поєднання кількісних та якісних аналітичних методів може надати більш повну картину гендерної рівності в освітніх закладах. Передбачає використання опитувань, інтерв'ю, аналіз статистичних даних та застосування спеціалізованих програмних інструментів для обробки та візуалізації інформації.

На цьому тлі зростає важливість використання UML (Unified Modelling Language) для проектування інформаційно-аналітичних систем: використання діаграм UML дозволяє створювати стандартизовані моделі, зрозумілі всім учасникам процесу розробки, які можуть описувати структуру та поведінку системи. Важливість використання UML-діаграм була підкреслена авторами Lee [6] та Harris [7], які продемонстрували, що використання UML може значно покращити якість та зрозумілість систем, що розробляються.

Значна увага також приділяється правовим аспектам гендерної рівності: дослідження науковців White [8] та Martin [9] показують, що законодавчі ініціативи та регуляторні механізми можуть суттєво сприяти зменшенню гендерної дискримінації. Важливим є також дотримання міжнародних стандартів та рекомендацій, зокрема, розроблених ООН та Європейським Союзом.

Таким чином, аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить про важливість комплексного підходу до вирішення проблеми гендерної нерівності у закладах вищої освіти. Використання сучасних інформаційно-аналітичних систем, інтеграція правових механізмів та застосування різноманітних аналітичних методів, зокрема UML-діаграм, дозволяють створити ефективну систему моніторингу та управління гендерною рівністю, що призведе до підвищення якості освіти та створення сприятливого освітнього середовища та освітнього процесу.

Результати дослідження. Для ефективного проектування архітектури ІАСМГР на наш погляд доцільно використовувати мову UML (Unified Modeling Language). Використання мови UML при впровадженні ІАСМГР доцільно з урахуванням багатьох об'єктивних передумов.

По-перше, надає стандартизований спосіб опису структури та функціонування такої системи, допомагає розробникам чітко розуміти функціональність ІАСМГР, а в контексті вирішення дослідницьких завдань, дозволяє їм враховувати всі аспекти та критерії, необхідні для оцінки гендерної рівності при проектуванні системи.

По-друге, UML дозволяє не тільки системним архітекторам інформаційно-аналітичної системи, але і програмістам, які вирішують локальні завдання збору інформації з веб-сайту закладу вищої освіти, візуалізувати структуру і поведінку системи. А це, в свою чергу, значно спрощує спілкування між учасниками проекту з впровадження ІАСМРГ. Останнє особливо важливо для ІАСМРГ, оскільки клієнти та користувачі можуть стати ІТ-спеціалістами, а також експертами з гендерної рівності.

По-третє, використовуючи потенціал UML, можна розробити архітектуру ІАСМРГ та визначити компоненти і зв'язки між ними. Це дозволить в майбутньому створити ефективну архітектуру ІАСМРГ, яка зможе обробляти і аналізувати великі обсяги даних, необхідних не тільки університетам, а й іншим зацікавленим сторонам, таким як Міністерство освіти і науки, а також міжнародним організаціям, які проводять такий моніторинг.

Незважаючи на те, що UML не є мовою програмування, а на основі UML-діаграм можна генерувати код на різних мовах програмування. Це спрощує процес розробки, дозволяючи створювати прототипи та тестувати ідеї. Відзначимо, що UML є одним з інструментів, що використовуються в області розробки програмного забезпечення.¹ Таким чином, розробка ІАСМРГ, як і будь-яка інша інформаційна система, передбачає проектування, аналіз та розробку програмного забезпечення, що є основною метою досліджень та практики в галузі комп'ютерних наук.

Розпочнемо проектування ІАСМРГ з розробки діаграми класів (Class Diagram), див. рис. 1, яка описує модуль програмної реалізації критерію моніторингу гендерної рівності під час відбору кандидатів на вакантні посади.

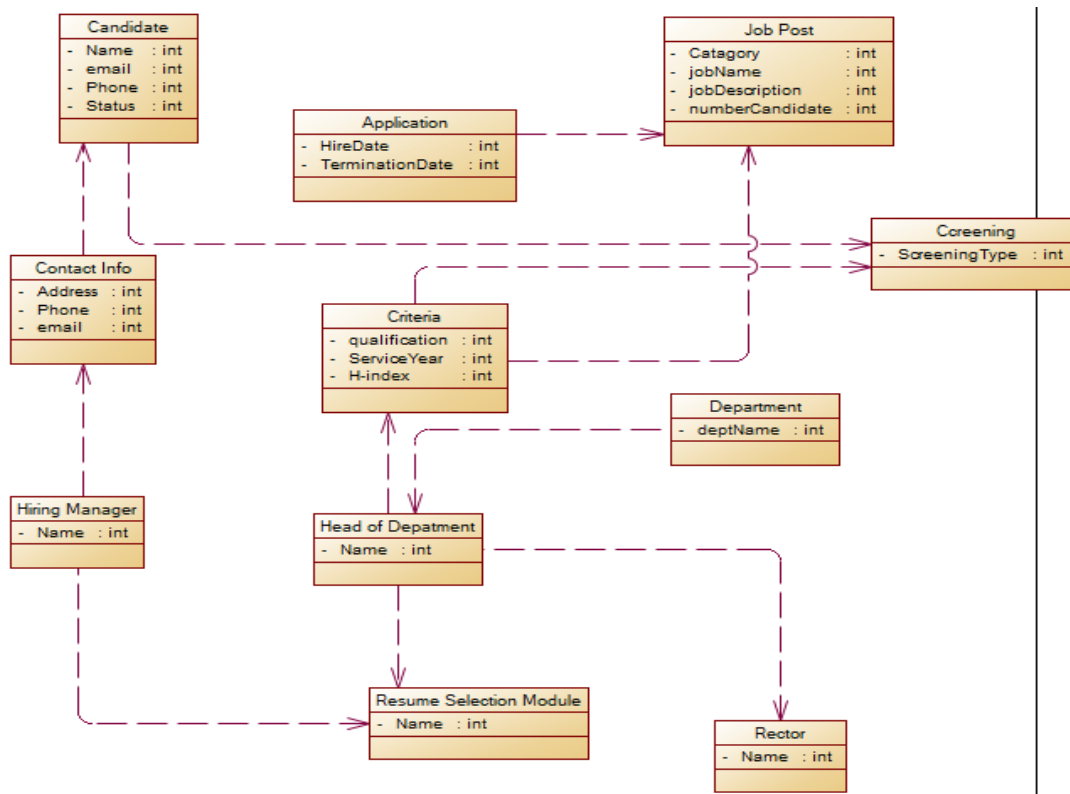


Рис. 1. Фрагмент діаграми класів з урахуванням використання «Перевірки на гендерну упередженість» під час відбору кандидатів на вакансії

Джерело: побудовано автором

На рис. 1 частково показано базові класи, необхідні для рішення поставленого завдання:

Клас кандидат

Атрибути даного класу: ПІБ кандидата; адреса електронної пошти; стать не вказується; освіта (список дипломів і сертифікатів); список місць роботи і посад; перелік професійних навичок.

Клас вакансія

Даний клас має такі атрибути: назва вакансії; опис вимог до вакансії; мінімальні та максимальні значення для кожної ознаки.

Клас критерії відбору

Атрибути класу: перелік критеріїв, за якими оцінюється кандидат на вакантну посаду.

Клас система (у даному випадку це підсистема ІАСМГР для оцінки кандидатур на вакантні посади закладу вищої освіти)

Клас аналіз резюме

Атрибути даного класу: ПІБ кандидата. Даний клас проводить автоматичний аналіз резюме кандидатів на відповідність вимогам вакансії.

Клас оцінка відповідності. Модель, яка обчислює ступінь відповідності кандидата вакансії.

Система аналізує резюме кандидата та оцінює його відповідність вакансії. Система рекомендує кандидата рекрутеру та керівнику відділу. Стаття кандидата не враховується при аналізі резюме та оцінці відповідності. Ціннісні орієнтири та критерії відбору на вакансії не включають в себе гендерні стереотипи, тому дана система запобігає гендерній упередженості при аналізі резюме.

Для більш ефективної оцінки гендерної рівності, на думку авторів, доцільно впровадити методи формалізації. Даний метод дасть змогу імплементувати семантику UML-діаграм, їх трансформацію під час факторингу, при розробленні ІАСМГР. Дана імплементация необхідна для проведення алгоритмізації формальних методів опису трансформацій з метою використання їх у рефакторингу ІАСМГР. Програмне забезпечення для рефакторингу UML-діаграми класів є необхідними для даної системи. Безпосередньо UML-діаграми надто трудомістко аналізувати й редагувати ручним способом, особливо у тих випадках, коли необхідно спроектувати ІАСМГР для декількох закладів вищої освіти та/або коледжів. Тому для вказаних систем доцільно використовувати програмне забезпечення для факторингу, що надасть спроможність обраховувати метрики, аналізувати UML-діаграми, з метою доцільності використання патернів проектування.

Зокрема, наявну UML-діаграму класів (подано на рис. 1) позначимо як (d) , задану величину семантично еквівалентних трансформацій позначимо як (T) , а цільову функцію відповідно $f(d)$. Тоді множина семантично еквівалентних трансформацій UML-діаграму класів для інформаційно-аналітична система моніторингу гендерної рівності може мати такий функціонал:

- додавання нового класу з метою подання додаткової інформації про професорсько-викладацький склад (наприклад, клас «Додаткові дані про співробітника»), який має атрибути з інформацією про кваліфікацію персоналу, досвід роботи;
- додавання в наявний клас нового методу, завдання якого входить обробка інформації про гендерну рівність (наприклад метод «Обчислити індекс гендерної рівності»);
- заміна типу атрибуту з метою точного врахування гендерної належності працівника (наприклад, заміна типу «Стать» з рядкового на перелічуваний тип з такими значеннями: «Чоловічий» і «Жіночий»;
- додавання в наявний клас нового атрибуту «Гендерна ідентифікація» для зберігання інформацію про гендерну ідентифікацію.

Цільова функція $f(d)$ для рефакторингу UML-діаграм класів в ІАСМГР може бути спрямована на:

- забезпечення гендерної нейтральності в архітектурі системи, з метою уникнення упередженості під час опрацювання даних про професорсько-викладацький та науковий склад, зокрема під час рекрутингу;
- поліпшення структури класів ІАСМГР для зручнішого й ефективнішого зберігання інформації про професорсько-викладацький та науковий склад, їх гендерну приналежність;
- підвищення рівня абстракції для гнучкішого ІАСМГР та легшого внесення змін у її структуру в майбутньому.

Тому цільова функція $f(d)$ має мінімізувати кількість класів і методів, пов'язаних із гендерною ідентифікацією, при збереженні повноти і точності подання інформації про гендерну рівність серед професорсько-викладацького та наукового складу працівників освіти.

Тоді, потрібно відшукати таку множину пар $\{t, E\}$, щоб була справедлива рівність:

$$d' = t\{d, E\}, \Delta f(d') < 0, \quad (1)$$

де d' – це нова діаграма класів, яку було отримано з вихідної діаграми класів (d) шляхом застосування до неї трансформації (t) до певної підмножини елементів.

Проілюструємо це простим прикладом: наявна вихідна діаграма класів (d) , яка описує структуру професорсько-викладацького та наукового складу закладу вищої освіти:

```
class Employee
{
    int id;
    string name;
    string gender;
    int age;
    string position;
    double salary;
}
```

Припустимо, що розробники ІАСМГР хочуть створити нову діаграму класів (d'), що описуватиме працівників освіти без згадки статі (*gender*) для дотримання принципу гендерної нейтральності. Для цього необхідно імплементувати трансформацію (t) до вихідної діаграми (d), виключивши з неї атрибут *gender*:

```
class Employee
{
    int id;
    string name;
    int age;
    string position;
    double salary;
}
```

Таким чином, діаграма класів (d') є результатом імплементування трансформації (t) до діаграми класів (d), виключивши атрибут *gender*. Таким чином дотримується принцип гендерної рівності.

Для ілюстрації цільової функції для рефакторингу UML-діаграми класів $f(d)$, поданої на рис. 1, необхідно проаналізувати структурну складність вказаної UML-діаграми класів з точки зору її формального опису.

Шлях є діаграма класів:

$$d = \{C, I, P, R\}, \quad (2)$$

де C, I, P, R позначено відповідні множини:

- $\square$ – класів (d);
- I – інтерфейсів (d);
- R – відносин (d);
- P – потужності (d).

Процедури пов'язані з визначенням кількості класів та інтерфейсів, під час проектування ІАСМГР, являють собою аналіз вимог до системи і виділення сутностей та їхніх взаємодій. На даному етапі програмісти та/або системні аналітики, які беруть участь у реалізації проєкту, визначають класи та їх інтерфейси необхідні для реалізації функціональності системи. Наприклад, для ІАС МГР у конкретному закладі вищої освіти знадобляться класи, які містять інформацію про професорсько-викладацький та науковий склад закладу освіти, їхні характеристики (наприклад, стать, рівень освіти, посада) і класи для роботи з базою даних.

Інтерфейси визначатимуть способи взаємодії з користувачами системи або іншими системами (наприклад, введення даних, відображення результатів аналізу, як ми це покажемо в наступному розділі роботи, тощо). Визначення кількості класів та інтерфейсів важливе насамперед для розуміння структури майбутньої системи та її можливостей. Відносини між класами в ІАСМГР визначаються різними факторами: асоціація, композиція, агрегація та успадкування. Клас «ЗВО» у базах даних ІАСМГР пов'язаний із класом «Працівник» через асоціацію. Дані відношення вказують на те, що заклад освіти має працівників, кожен із яких, має відповідну гендерну належність.

З точки зору методології проектування інформаційних систем, визначення кількості та типів відносин між класами є важливим для розуміння структури, в даному випадку ІАСМГР, та її функціональності, яка обумовлена технічним завданням. Чітке розуміння відносин між класами дасть змогу оптимізувати процес проектування, поліпшити читабельність і підтримку коду, а також забезпечить ефективну

взаємодію між різними частинами системи, що є актуальним, адже з часом функціональні компоненти системи можуть збільшуватися.

Наприклад, для цілей дослідження структурної складності діаграми класів, поданої на рис. 1, можна встановити цільову функцію рефакторингу $f(d)$, яка враховуватиме усілякі аспекти складності діаграми. Одним з імовірних підходів до опису структурної складності UML-діаграми класів є застосування міри, що базується на кількості елементів класів та їхніх взаємовідносин.

Припустимо, що необхідно оцінити складність діаграми класів $f(d)$ за такими критеріями:

Кількість класів та інтерфейсів $(|C| + |I|)$;

Кількість відносин між класами $(|R|)$;

Ступінь зв'язності діаграми (тобто взаємовідносини між класами) $(|G|)$.

Цільова функція $f(d)$ може бути сформульована, наприклад, як сума цих характеристик, зважена певними коефіцієнтами для врахування їхньої важливості:

$$f(d) = w_1 \cdot (|C| + |I|) + w_2 \cdot (|R|) + w_3 \cdot (|G|), \quad (3)$$

де w_1, w_2, w_3 – відображення коефіцієнтів важливості кожної з характеристик.

Наприклад, якщо важливішою є кількість класів та інтерфейсів, то можна задати $w_1 > w_2$. Дана функція має здатність охарактеризувати структурну складність діаграми класів, використавши її при ухваленні рішенні щодо необхідності застосування рефакторингу та його можливих напрямів.

У загальному випадку функція $K(d)$ визначає складність UML-діаграми класів (d) наступним чином:

$$K(d) = |C| + |I| + |R| + \sum_{i=0}^n |A_i| + \sum_{i=0}^n |M_i| + \sum_{j=0}^n |M'_j|, \quad (4)$$

де наявні такі множини: A_i – атрибутів класу (c_i) , $c_i \in C, i \in 0, \dots, n$;

M_i – методів класу (c_i) , $c_i \in C, i \in 0, \dots, n$, окрім тих методів, які належать реалізованим класом (c_i) інтерфейсам (i_l) , $l \in 0, \dots, k$, де k – кількість інтерфейсів, що реалізуються (c_i) , а M'_j – це множина методів конкретного класу (i_j) , $i_j \in I, j \in 0, \dots, m$.

Тоді типовий інтерфейс для ІАСМГР в університеті виглядатиме так: Припустимо, що в нас є клас *GenderEqualityMonitoringSystem*, який надає доступ до функціональності системи. Нижче показано код для опису такого інтерфейсу на *Python*.

Цей інтерфейс містить чотири методи, які передбачають основні операції системи:

- завантаження даних;
- аналіз даних на предмет гендерної рівності;
- візуалізацію результатів;
- експорт результатів.

Класи, що реалізують цей інтерфейс, забезпечуватимуть конкретну реалізацію цих методів для роботи системи, що ми розглянемо в наступному параграфі роботи.

```
from abc import ABC, abstractmethod

class GenderEqualityMonitoringSystem(ABC):
    @abstractmethod
    def load_data(self, data_path):
        """Load data for analysis from the specified file or data source."""
        pass

    @abstractmethod
    def analyze_gender_equality(self):
        """Analyze data for gender equality."""
        pass

    @abstractmethod
    def visualize_results(self):
        """Visualize the results of the analysis."""
        pass

    @abstractmethod
    def export_results(self, output_path):
        """Export the analysis results to the specified file or format."""
        pass
        pass
```

Таким чином, розробка програмно-математичних засобів рефакторингу діаграми класів з урахуванням заданих критеріїв якості на основі формалізації та алгоритмічного забезпечення трансформації UML-діаграм класів у рамках модельно-орієнтованого підходу MDA є актуальним і важливим завданням.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Використання сучасних підходів до проектування архітектури інформаційних систем за допомогою UML-діаграми є ефективним інструментом для розробки ІАСМГР серед професорсько-викладацького складу ЗВО. Однак у плані конкретної реалізації ІАСМГР, видається, що більш важливим є зосередитися на більш специфічних моментах, наприклад, на питанні візуалізації зібраної аналітичної інформації щодо гендерного складу академічних працівників закладу освіти.

Перспективи подальших досліджень. З огляду на необхідність гнучкості та легкої розширюваності, ІАСМГР має бути реалізована з можливістю масштабування для роботи з великим об'ємом даних і розширення функціональності, щоб адаптуватися до потреб, які змінюються, і вимог у сфері моніторингу гендерної рівності.

Список використаних джерел:

1. Anderson J. The Impact of Gender Inequality on Work Efficiency in Educational Institutions. *Journal of Gender Studies*, 2018. 15(2), 123–145.
2. Brown L. Negative Effects of Gender Discrimination on Employee Motivation and Engagement. *International Journal of Human Resource Management*, 2019. 28(3), 256–278.
3. Cavique L., Cavique M., Mendes A., Cavique M. Покращення проектування інформаційних систем: використання UML та аксіоматичного проектування. *Computers in Industry*, 2022. 135, 103569.
4. Computer Support System for Choosing the Optimal Managing Strategy by the Mutual Investment Procedure in Smart City / Lakshno Valeriy, Malyukov Volodimir, Roskladka Andrii, Rzaieva Svitlana, Gamaliy Volodymir, Valeriy Kraskevich, and Olha Kasatkina. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Volume 1194, pp. 278–288. DOI: 10.1007/978-3-030-50454-0_26
5. Costa C. A., Harding J. A., Young R. I. Застосування UML і відкритого розподіленого процесу до проектування інформаційних систем. *Computers in Industry*, 2001. 46(1), 33–48.
6. Green, P. Combining Quantitative and Qualitative Methods for Comprehensive Understanding of Gender Equality. *Methodological Innovations*, 2017. 14(1), 33–50.
7. Harris T. Enhancing System Clarity and Quality Through UML Diagrams. *Journal of Systems and Software*, 2019. 102, 45–63.
8. Herawati S., Negara Y. D. P., Febriansyah H. F., Fatah D. A. Застосування методу водоспаду в інформаційній системі управління професійним навчанням на базі Інтернету в Університеті Труноджойоо Мадуро. У *E3S Web of Conferences*. 2021. (Vol. 328, p. 04026). EDP Sciences.
9. Johnson M. Real-Time Data Analysis for Gender Equality Monitoring in Universities. *Journal of Educational Technology*, 2021. 30(1), 78–95.
10. Lee S. The Importance of UML Diagrams in System Development. *Software Engineering Journal*. 2018. 25(6), 489–512.
11. Martin R. Regulatory Mechanisms for Ensuring Gender Equality in Higher Education. *European Journal of Education Law and Policy*, 2018. 21(2), 167–182.
12. Nickerson J. V., Corter J. E., Tversky B., Zahner D., Rho Y. J. Діаграми як інструменти в проектуванні інформаційних систем. In *Design Computing and Cognition'08: Proceedings of the Third International Conference on Design Computing and Cognition*. 2008. (pp. 103–122). Springer Netherlands.
13. Smith A. Development and Implementation of Information-Analytical Systems for Monitoring Gender Equality. *Information Systems Journal*. 2020. 22(4), 345–367.
14. White K. Legislative Initiatives and Their Impact on Reducing Gender Discrimination. *Journal of Legal Studies*. 2016. 19(3), 203–220.

УДК 004.056.55:004.312.2

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.28>

Володимир РУДНИЦЬКИЙ

доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник,
Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки,
rvn_2008@ukr.net

ORCID: 0000-0003-3473-7433

Віра БАБЕНКО

доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційної безпеки та комп'ютерної інженерії,
Черкаський державний технологічний університет, v.babenko@chdtu.edu.ua

ORCID: 0000-0003-2039-2841

Сергій РУДНИЦЬКИЙ

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій проектування, Черкаський державний технологічний університет,
провідний науковий співробітник,
Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки,
s.v.rudnitskiy@gmail.com

ORCID: 0000-0003-3071-7005

Тимофій КОРОТКИЙ

здобувач ступеня доктор філософії, кафедра інформаційних технологій проектування, Черкаський державний технологічний університет, t.k.korotkiy.asp21@chdtu.edu.ua

ORCID: 0009-0003-5159-5892

ГЕНЕРАЦІЯ ПОСЛІДОВНОСТІ НЕСИМЕТРИЧНИХ СЕТ-ОПЕРАЦІЙ З ТОЧНІСТЮ ДО ПЕРЕСТАНОВКИ ДРУГОГО ОПЕРАНДА

Анотація. Стаття присвячена побудові несиметричних СЕТ-операцій придатних для криптографічного перетворення інформації, а саме СЕТ-шифрування. Застосування СЕТ-операцій при побудові поточкових шифрів гарантує двонаправлену передачу інформації між абонентами. Особливість несиметричних СЕТ-операцій полягає в тому, що вони забезпечують в процесі шифрування однакової інформації з використанням однакових ключових послідовностей побудову різних шифрограм. Для вдосконалення поточкових шифрів велике значення має можливість застосування замість однієї несиметричної двоопераційної СЕТ-операції декількох, які мають однакові властивості. Саме тому задачі синтезу груп СЕТ-операцій з точністю до перестановки надзвичайно актуальні. Адже їх вирішення дозволить будувати генератори псевдовипадкових послідовностей СЕТ-операцій з однаковими властивостями, щоб забезпечити побудову криптографічних алгоритмів поточкового шифрування нового покоління.

Метою роботи є дослідження можливості застосування методу генерації груп несиметричних СЕТ-операцій з точністю до перестановки другого операнда для побудови малоресурсних несиметричних систем поточкового шифрування.

Методологія. У роботі показано, що генерувати групи операцій строгого стійкого кодування доцільно на основі модифікації СЕТ-операцій строгого стійкого кодування з точністю до перестановки другого операнда. Для синтезу моделей СЕТ-операцій, як прямих та і обернених, наведено один із способів реалізації їх методу побудови, що полягає в генерації послідовності несиметричних двоопераційних СЕТ-операцій з точністю до перестановки другого операнда. Здійснено перевірку коректності одержаних моделей для синтезу груп прямих і обернених несиметричних двоопераційних СЕТ-операцій на конкретних прикладах, що підтверджено результатами обчислювального експерименту для 2Сі-квантових несиметричних двоопераційних СЕТ-операцій. В ході проведеного дослідження використовувалися методи та принципи теорії інформації та кодування, булевої алгебри, дискретної математики, теорії синтезу та моделювання операцій та криптографії.

Наукова новизна. Наукова новизна роботи полягає в аналізі практичних аспектів застосування груп несиметричних СЕТ-операцій з точністю до перестановки другого операнда для побудови алгоритмів малоресурсної криптографії шляхом забезпечення генерації прямих і обернених несиметричних двоопераційних СЕТ-операцій за рахунок використання лише прямих одноопераційних СЕТ-операцій, що суттєво зменшує складність криптографічного алгоритму і складність реалізації криптографічної системи.

Висновок. У результаті дослідження встановлено наступне: усі несиметричні СЕТ-операції, які належать до синтезованої групи з точністю до перестановки другого операнда, мають однакові криптографічні властивості, оскільки однаково випадково реалізують одні і ті самі набори таблиць підстановок; можливість генерації груп прямих і обернених несиметричних СЕТ-операцій з точністю до перестановки другого операнда на основі будь якої двоопераційної СЕТ-операції забезпечить як шифрування, так і розшифрування інформації для побудови систем поточкового шифрування.

Ключові слова: малоресурсна криптографія, СЕТ-шифрування, моделювання СЕТ-операцій, дослідження СЕТ-операцій, несиметричні криптографічні перетворення, поточкове шифрування.

Volodymyr RUDNYTSKYI, Vira BABENKO, Serhii RUDNYTSKYI, Tymofii KOROTKYI. GENERATING A SEQUENCE OF ASYMMETRIC CET OPERATIONS WITH AN ACCURACY OF UP TO THE PERMUTATION OF THE SECOND OPERAND

Abstract. The article is devoted to the construction of asymmetric CET operations suitable for cryptographic information transformation, namely CET encryption. The use of CET operations in the construction of streaming ciphers guarantees bidirectional transmission of information between subscribers. The specific feature of asymmetric CET operations is that they provide different ciphers in the process of encrypting the same information using the same key sequences. To improve stream ciphers, it is of great importance to be able to use several asymmetric two-operand CET operations with the same properties instead of one. That is why the problems of synthesizing groups of CET operations with permutation accuracy are extremely relevant. After all, their solution will allow us to build generators of pseudo-random sequences of CET operations with the same properties to ensure the construction of new generation of cryptographic algorithms of stream encryption.

The purpose of the article is to study the possibility of using the method of generating groups of asymmetric CET operations with an accuracy of up to the permutation of the second operand to build low-resource asymmetric stream encryption systems.

Methodology. The paper shows that it is expedient to generate groups of operations of strictly stable coding on the basis of modifying the CET operation of strictly stable coding with an accuracy of permutation of the second operand. To synthesize models of CET operations, both direct and reverse, one of the ways to implement their construction method is presented, which consists in generating a sequence of asymmetric two-operand CET operations with an accuracy of permutation of the second operand. The correctness of the obtained models for the synthesis of groups of direct and reverse asymmetric two-operand CET operations is verified on specific examples, which is confirmed by the results of a computational experiment for 2Ci-quantum asymmetric two-operand CET operations. In the course of the study, the methods and principles of information and coding theory, Boolean algebra, discrete mathematics, the theory of synthesis and modeling of operations, and cryptography were used.

Scientific novelty. The scientific novelty of the work is to analyze the practical aspects of using groups of asymmetric CET operations with an accuracy of up to the permutation of the second operand to build low-resource cryptography algorithms by ensuring the generation of direct and reverse asymmetric two-operand CET operations by using only direct one-operand CET operations, which significantly reduces the complexity of the cryptographic algorithm and the complexity of the cryptographic system implementation.

Conclusion. As a result of the study, the following was found: all asymmetric CET operations belonging to the synthesized group with an accuracy of up to the permutation of the second operand have the same cryptographic properties, since they implement the same sets of substitution tables in the same way by chance; the ability to generate groups of forward and reverse asymmetric CET operations with an accuracy of up to the permutation of the second operand on the basis of any two-operand CET operation will provide both encryption and decryption of information for building streaming encryption systems.

Key words: low-resource cryptography, CET encryption, modeling of CET operations, investigation of CET operations, asymmetric cryptographic transformations, stream encryption.

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток інформаційно-телекомунікаційних систем і комп'ютерних мереж зумовив різке зростання кіберзлочинів, пов'язаних з несанкціонованим доступом до інформації. Саме тому проблема криптографічного захисту конфіденційної інформації в комп'ютерних системах і мережах в умовах сьогодення є надзвичайно актуальною. Вирішення даної проблеми полягає в ефективному комплексному захисті інформації при її зберіганні [11, 12], при передачі [9, 16], і при обробці [14]. Одним із найефективніших засобів протидії несанкціонованому доступу до конфіденційної інформації є її шифрування. Традиційні стандартизовані криптографічні алгоритми забезпечують необхідний захист інформації, проте їх реалізація, як правило, ресурсноємна, а застосування є високо витратним. Відомо, що підвищення ефективності функціонування комп'ютерної мережі зумовлює зменшення ресурсів, які можуть бути виділені для реалізації криптографічного захисту інформації. Тому доцільно при реалізації захищених комп'ютерних мереж використовувати мало ресурсну криптографію [10, 15, 19, 20].

Необхідно відмітити, що забезпечення високої криптографічної стійкості вступає в протиріччя з необхідністю високошвидкісного захисту колосальних обсягів інформації в реальному часі, яка циркулює в кіберпросторі. Виходячи з цього, криптографічні системи розраховані на масове застосування повинні бути криптостійкими, малоресурсними та водночас і високошвидкісними, а також мати незначну вартість експлуатаційних витрат. Даним вимогам в достатній мірі можуть відповідати малоресурсні поточкові шифри побудовані на основі несиметричних CET-операцій. Застосування CET-операцій при побудові поточкових шифрів гарантує двонаправлену передачу інформації між абонентами. Особливість несиметричних CET-операцій полягає в тому, що вони забезпечують в процесі шифрування однакової інформації з використанням однакових ключових послідовностей побудову різних шифрограм. Для вдосконалення поточкових шифрів велике значення має можливість застосування замість однієї несиметричної двохоперандної CET-операції декількох, які мають однакові властивості. Саме тому задачі синтезу груп CET-операцій з точністю до перестановки надзвичайно актуальні. Адже їх вирішення дозволить будувати генератори псевдовипадкових послідовностей CET-операцій з однаковими властивостями, щоб забезпечити побудову криптографічних алгоритмів потокового шифрування нового покоління.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Мінімальною складністю, простотою і високою швидкістю реалізації володіють поточкові шифри на основі додавання за модулем два [13]. Проте дані поточкові шифри мають недостатню криптостійкість, пов'язану з обмеженою довжиною псевдовипадкової

послідовності і використанням в процесі шифрування лише однієї операції криптографічного перетворення. Використання більшої кількості операцій, на основі яких виконується криптографічне перетворення інформації, ускладнює задачу криптоаналізу [8]. Це пов'язано з необхідністю визначення як псевдовипадкової послідовності, так і операції або набору операцій, на основі яких було реалізовано шифрування. Операції криптографічного додавання за будь-яким модулем можна розглядати як симетричні двооперандні СЕТ-операції [1,2]. Результати досліджень [3, 8] показали ефективність використання в поточних шифрах груп операцій з точністю до перестановки. Для побудови симетричних поточних шифрів використовуються групи модифікованих операцій криптографічного додавання з точністю до перестановки [5, 6], а також групи симетричних двооперандних СЕТ-операцій, побудованих на основі кортежів однооперандних СЕТ-операцій [7, 17, 18]. Проте на сьогоднішній день особливості реалізації методу синтезу груп несиметричних СЕТ-операцій з точністю до перестановки другого операнда для побудови систем поточного шифрування не досліджувалися.

Метою роботи є дослідження можливості застосування методу генерації груп СЕТ-операцій з точністю до перестановки другого операнда для побудови малоресурсних несиметричних систем поточного шифрування.

Виклад основного матеріалу. Результати моделювання груп несиметричних двооперандних СЕТ-операцій з точністю до перестановки другого операнда. В ході дослідження операцій строгого стійкого кодування було встановлено, що генерувати групи операцій строгого стійкого кодування доцільно на основі модифікації СЕТ-операції строгого стійкого кодування з точністю до перестановки другого операнда [4].

Генерація груп прямих СЕТ-операцій строгого стійкого кодування з точністю до перестановки другого операнда може бути реалізована на основі моделі [8]:

$$C^*(x, y) = C(x, C_i(y)), \quad (1)$$

де $C(x, y)$ – двооперандна СЕТ-операція строгого стійкого кодування; x – значення першого операнда; y – значення другого операнда, $C^*(x, y)$ – група двооперандних СЕТ-операцій строгого стійкого кодування з точністю до перестановки другого операнда; $C_i(y)$ – однооперандна СЕТ-операція для модифікації другого операнда, $i \in \{1; 2; \dots; h\}$; h – кількість однооперандних СЕТ-операцій для перетворення другого операнда, $h \leq 2^m$; m – кількість біт-квантів інформації в другому операнді.

Генерація груп обернених двооперандних СЕТ-операцій строгого стійкого кодування з точністю до перестановки другого операнда може бути задана виразом [8]:

$$C'^*(x, y) = C'(x, C_i(y)), \quad (2)$$

де $C'(x, y)$ – обернена двооперандна СЕТ-операція строгого стійкого кодування $C'^*(x, y)$, – група обернених двооперандних СЕТ-операцій строгого стійкого кодування з точністю до перестановки другого операнда.

Перевіримо коректність моделей (1) і (2) для синтезу груп прямих і обернених несиметричних двооперандних СЕТ-операцій на прикладі.

Нехай модель несиметричної двооперандної 2Сі-квантової СЕТ-операції [13] задана кортежем із чотирьох однооперандних 2Сі-квантових СЕТ-операцій.

Якщо $C_1(x) = \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \end{bmatrix} = z$; $C_2(x) = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix} = z$; $C_3(x) = \begin{bmatrix} x_2 \oplus 1 \\ x_1 \end{bmatrix} = z$; $C_4(x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \end{bmatrix} = z$, де $C_i(x)$ – i -та од-

нооперандна СЕТ-операція; x_1 і x_2 – перший і другий біт-кванти першого операнда (вхідна інформація); z – результат криптографічного перетворення (2 біт-кванти), тоді:

$$C(x, y) = C(C_1(x), C_2(x), C_3(x), C_4(x)) = z; \quad (3)$$

$$C(x, y) = \begin{cases} \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \end{bmatrix}, & \text{якщо } y_1 = 0; y_2 = 0 \\ \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix}, & \text{якщо } y_1 = 0; y_2 = 1 \\ \begin{bmatrix} x_2 \oplus 1 \\ x_1 \end{bmatrix}, & \text{якщо } y_1 = 1; y_2 = 0 \\ \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \end{bmatrix}, & \text{якщо } y_1 = 1; y_2 = 1 \end{cases} = z, \quad (4)$$

де $C(x, y)$ – двооперандна СЕТ-операція; y_1 і y_2 перший і другий Сі-кванти другого операнда (інформація керування); z – результат криптографічного перетворення (2 Сі-кванти).

На основі моделі (1) отримаємо:

$$C(x, y) = \begin{bmatrix} x_1 \cdot \bar{y}_1 \oplus x_2 \cdot y_1 \oplus \bar{y}_2 \\ x_1 \cdot y_1 \oplus x_2 \cdot \bar{y}_1 \oplus \bar{y}_1 \cdot y_2 \end{bmatrix} = z. \quad (5)$$

Слід відмітити, що для побудови систем потокового шифрування необхідно генерувати як псевдовипадкові послідовності СЕТ-операцій як для прямого, так і для оберненого криптографічного перетворення. Взаємно відповідність даних послідовностей забезпечить як шифрування, так і розшифрування інформації.

Оскільки $C'_1(z) = \begin{bmatrix} z_1 \oplus 1 \\ z_2 \end{bmatrix} = x$; $C'_2(z) = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \oplus 1 \end{bmatrix} = x$; $C'_3(z) = \begin{bmatrix} z_2 \\ z_1 \oplus 1 \end{bmatrix} = x$; $C'_4(z) = \begin{bmatrix} z_2 \\ z_1 \end{bmatrix} = x$, тоді:

$$C'(z, y) = C(C'_1(z), C'_2(z), C'_3(z), C'_4(z)) = x; \quad (6)$$

$$C'(z, y) = \begin{cases} \begin{bmatrix} z_1 \oplus 1 \\ z_2 \end{bmatrix}, & \text{якщо } y_1 = 0; y_2 = 0 \\ \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \oplus 1 \end{bmatrix}, & \text{якщо } y_1 = 0; y_2 = 1 \\ \begin{bmatrix} z_2 \\ z_1 \oplus 1 \end{bmatrix}, & \text{якщо } y_1 = 1; y_2 = 0 \\ \begin{bmatrix} z_2 \\ z_1 \end{bmatrix}, & \text{якщо } y_1 = 1; y_2 = 1 \end{cases} = x. \quad (7)$$

На основі моделі (7) отримаємо

$$C'(z, y) = \begin{bmatrix} z_1 \cdot \bar{y}_1 \oplus z_2 \cdot y_1 \oplus y_1 \cdot y_2 \\ z_1 \cdot y_1 \oplus z_2 \cdot \bar{y}_1 \oplus (y_1 \oplus y_2) \end{bmatrix} = z. \quad (8)$$

Модифікуємо другий операнд моделі прямої СЕТ-операції (4) однооперандною операцією $C_3(x)$. У результаті модифікації отримаємо:

$$C(x, y) = \begin{cases} \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \end{bmatrix}, & \text{якщо } y_1 = 1; y_2 = 0 \\ \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix}, & \text{якщо } y_1 = 0; y_2 = 0 \\ \begin{bmatrix} x_2 \oplus 1 \\ x_1 \end{bmatrix}, & \text{якщо } y_1 = 1; y_2 = 1 \\ \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \end{bmatrix}, & \text{якщо } y_1 = 0; y_2 = 1 \end{cases} = \begin{cases} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \oplus 1 \end{bmatrix}, & \text{якщо } y_1 = 0; y_2 = 0 \\ \begin{bmatrix} x_2 \\ x_1 \end{bmatrix}, & \text{якщо } y_1 = 0; y_2 = 1 \\ \begin{bmatrix} x_1 \oplus 1 \\ x_2 \end{bmatrix}, & \text{якщо } y_1 = 1; y_2 = 0 \\ \begin{bmatrix} x_2 \oplus 1 \\ x_1 \end{bmatrix}, & \text{якщо } y_1 = 1; y_2 = 1 \end{cases} = z;$$

$$C(x, y) = \begin{bmatrix} x_1 \cdot \bar{y}_1 \oplus x_2 \cdot y_1 \oplus y_1 \\ x_1 \cdot y_1 \oplus x_2 \cdot \bar{y}_1 \oplus \bar{y}_1 \cdot y_2 \end{bmatrix} = z; \quad (9)$$

$$C(x, y) = C(C_2(x), C_4(x), C_1(x), C_3(x)) = z. \quad (10)$$

Модифікуємо другий операнд моделі оберненої СЕТ-операції (7) однооперандною операцією $C_3(x)$. У результаті реалізованої модифікації отримаємо:

$$C'(z, y) = \begin{cases} \begin{bmatrix} z_1 \oplus 1 \\ z_2 \end{bmatrix}, \text{якщо } y_1 = 1; y_2 = 0 \\ \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \oplus 1 \end{bmatrix}, \text{якщо } y_1 = 0; y_2 = 0 \\ \begin{bmatrix} z_2 \\ z_1 \oplus 1 \end{bmatrix}, \text{якщо } y_1 = 1; y_2 = 1 \\ \begin{bmatrix} z_2 \\ z_1 \end{bmatrix}, \text{якщо } y_1 = 0; y_2 = 1 \end{cases} = \begin{cases} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \oplus 1 \end{bmatrix}, \text{якщо } y_1 = 0; y_2 = 0 \\ \begin{bmatrix} z_2 \\ z_1 \end{bmatrix}, \text{якщо } y_1 = 0; y_2 = 1 \\ \begin{bmatrix} z_1 \oplus 1 \\ z_2 \end{bmatrix}, \text{якщо } y_1 = 1; y_2 = 0 \\ \begin{bmatrix} z_2 \\ z_1 \oplus 1 \end{bmatrix}, \text{якщо } y_1 = 1; y_2 = 1 \end{cases} = x. \\ C'(z, y) = \begin{bmatrix} z_1 \cdot \bar{y}_2 \oplus z_2 \cdot y_2 \oplus y_1 \cdot \bar{y}_2 \\ z_1 \cdot y_1 \oplus z_2 \cdot \bar{y}_1 \oplus (y_1 \oplus y_2 \oplus 1) \end{bmatrix} = x. \quad (11)$$

$$C'(z, y) = C(C'_2(z), C'_4(z), C'_1(z), C'_3(z)) = x. \quad (12)$$

За результатом моделювання можна зробити висновок про можливість генерації груп прямих і обернених несиметричних СЕТ-операцій з точністю до перестановки другого операнда на основі будь-якої двоопераційної СЕТ-операції. Коректність даного висновку підтверджена результатами обчислювального експерименту для 2Сі-квантових несиметричних двоопераційних СЕТ-операцій.

Обговорення результатів моделювання груп несиметричних СЕТ-операцій з точністю до перестановки другого операнда. Оскільки моделі прямих несиметричних двоопераційних 2Сі-квантових СЕТ-операцій (5) і (8) відрізняються, то можна стверджувати, що модифікація несиметричної СЕТ-операції з точністю до перестановки другого операнду призводить до зміни результату криптографічного перетворення.

Кортежі прямих несиметричних двоопераційних 2Сі-квантових СЕТ-операцій (3) і (10) включають в себе переставлені місцями одні і ті ж самі одноопераційні СЕТ-операції. Тому можна стверджувати, що модифікація несиметричної двоопераційної СЕТ-операції не призводить до зміни таблиць підстановок, на основі яких реалізується криптографічне перетворення.

Однакові послідовності прямих і обернених до них одноопераційних СЕТ-операцій в кортежах прямої (10) та оберненої (12) двоопераційних СЕТ-операцій продемонстрували коректність застосування моделей генерації псевдовипадкових послідовностей операцій (1) і (2).

Оскільки в процесі модифікації двоопераційної СЕТ-операції набір одноопераційних операцій не змінюється, а змінюється лише їх послідовність, можна стверджувати, що всі отримані операції будуть мати однакові криптографічні властивості, тому що реалізують однакові таблиці підстановок.

Реалізація генераторів груп прямих обернених несиметричних двоопераційних СЕТ-операцій з точністю до перестановки другого операнда вимагає застосування прямої і оберненої несиметричної СЕТ-операції та набору лише прямих одноопераційних СЕТ-операцій. Відсутність у моделях синтезу генерацій (1) і (2) обернених одноопераційних СЕТ-операцій забезпечує суттєве спрощення алгоритмів СЕТ-шифрування.

Подальші дослідження будуть направлені на пошук методів синтезу груп несиметричних двоопераційних СЕТ-операцій, які забезпечать в процесі модифікації операції зміну таблиць підстановки (одноопераційних СЕТ-операцій).

Висновки. Зважаючи на вище наведений опис проведеного дослідження та проаналізувавши одержані результати, можна сформулювати наступні висновки:

1. За результатами дослідження встановлено, що метод генерації двоопераційних СЕТ-операцій з точністю до перестановки другого операнда може бути використаний для генерації груп несиметричних двоопераційних СЕТ-операцій.

2. Усі несиметричні СЕТ-операції, які належать до синтезованої групи з точністю до перестановки другого операнда, мають однакові криптографічні властивості, оскільки однаково випадково реалізують одні і ті самі набори таблиць підстановок.

3. Встановлено, що на основі будь-якої несиметричної двоопераційної СЕТ-операції з відомими криптографічними властивостями шляхом застосування даного методу може бути побудована група двоопераційних СЕТ-операцій з точністю до перестановки другого операнду. Всі модифіковані операції даної групи будуть мати однакові криптографічні властивості.

4. Для забезпечення генерації прямих і обернених несиметричних двохоперандних CET-операцій використовуються лише прямі однооперандні CET-операції. Це суттєво зменшує складність криптографічного алгоритму і складність реалізації криптографічної системи.

Список використаних джерел:

1. Бабенко В. Г., Лада Н. В. Синтез і аналіз операцій криптографічного додавання за модулем два. *Системи обробки інформації*. 2014. Вип. 2 (118). С. 116–118.
2. Бабенко В. Г., Лада Н. В. Технологія дослідження операцій за модулем два. *Smart and Young: щомісячний наук. журн.* 2016. № 11–12. Ч. 1. С. 49–54.
3. Бабенко В. Г., Лада Н. В. Аналіз результатів виконання модифікованих операцій додавання за модулем два з точністю до перестановки. *The scientific potential of the present: proceedings of the Internat. sci. conf., (St. Andrews, Scotland, UK, December, 1, 2016)* / ed. N. P. Kazmyna. NGO «European Scientific Platform». Vinnytsia: PE Rogalska I. O., 2016. С. 108–111.
4. Лада Н. В., Бреус Р. В., Лада С. В. Генерація моделей прямих і обернених двохоперандних двохоперандних операцій строгого стійкого криптографічного кодування. *Science and Education a New Dimension Natural and Technical science*. 2020. V. 224. Р. 31–37.
5. Лада Н. В., Козловська С. Г., Рудницька Ю. В. Дослідження і синтез групи симетричних модифікованих операцій додавання за модулем чотири. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2019. Вип. 2 (33). С. 181–189. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2\(33\).181-189](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.2(33).181-189).
6. Лада Н. В., Рудницький С. В., Зажома В. М., Рудницька Ю. В. Дослідження і синтез групи симетричних модифікованих операцій правостороннього додавання за модулем чотири. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2020. № 1 (59). С. 93–96. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.1.093>.
7. Рудницька Ю. В., Рудницький С. В. Моделювання симетричних операцій криптографічного кодування. *Проблеми інформатизації: Десята міжнар. наук.-техн. конф.: тези доп.*, (24 – 25 листоп. 2022 р. Черкаси), 2022. Т. 2. С. 10.
8. Рудницький В. М., Лада Н. В., Кучук Г. А., Підласий Д. А. Архітектура CET-операцій і технології потокового шифрування. *Architecture of CET-operations and stream encryption technologies: монографія*. Черкаси: видавець Пономаренко Р.В., 2024. 374 с. ISBN 978-966-2554-81-6 URL: <https://dndivsovt.com/index.php/monograph/issue/view/22/22>
9. Borky J. M., Bradley T. H. Protecting Information with Cybersecurity. In: *Effective Model-Based Systems Engineering*. Springer, Cham. 2019, pp. 345–404. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95669-5_10
10. Dandin T.J.E., Krishnaveni D., Chandrasekhar K. Light Weight Cryptography and Its Application in Resource Constrained Environment Using Reversible Logic. In: Gunjan, V.K., Zurada, J.M. (eds) *Proceedings of the 2nd International Conference on Recent Trends in Machine Learning, IoT, Smart Cities and Applications. Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer, Singapore, 2022. Vol. 237, pp. 473–489. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6407-6_43
11. Eldem T. Global Cyberspace Security and Critical Information Infrastructure Protection. In: Farazmand, A. (eds) *Global Encyclopedia of Public Administration, Public Policy, and Governance*. Springer, Cham. 2021, pp. 1–11. https://doi.org/10.1007/978-3-319-31816-5_3987-1
12. Keshattiwar P., Lokulwar P., Saraf P. Empowering Data Defender's Comprehensive Security Measures for Robust Information Protection in Robust-Cloud Environments. *2024 International Conference on Innovations and Challenges in Emerging Technologies (ICICET)*, Nagpur, India, 2024, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICICET59348.2024.10616293>
13. Massey J. L. An introduction to contemporary cryptology. In *Proceedings of the IEEE*, 1988. Vol. 76, no. 5, pp. 533–549. URL: <https://scispace.com/pdf/an-introduction-to-contemporary-cryptology-60eevadgo7.pdf>
14. Nadj B. Data Security, Integrity, and Protection. In: McClellan, S. (eds) *Data, Security, and Trust in Smart Cities. Signals and Communication Technology*. Springer, Cham. 2024, pp. 59–83. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61117-9_4
15. Pandey S., Bhushan B. Recent Lightweight cryptography (LWC) based security advances for resource-constrained IoT networks. *Wireless Netw.* 2024. Vol. 30, pp. 2987–3026. <https://doi.org/10.1007/s11276-024-03714-4>
16. Preyaa Atri. Enhancing Big Data Security through Comprehensive Data Protection Measures: A Focus on Securing Data at Rest and In-Transit. *International Journal of Computing and Engineering*. 2024. 5(4), pp. 44–55. <https://doi.org/10.47941/ijce.1920>
17. Rudnytskyi V., Babenko V., Lada N., Tarasenko Ya., Rudnytska Yu. Constructing symmetric operations of cryptographic information encoding. *CEUR Workshop Proceedings*, 2022. Vol. 3187, pp. 182–194. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3187/paper17.pdf>
18. Rudnytskyi V., Lada N., Pochebut M., Melnyk O., Tarasenko Ya. Increasing the cryptographic strength of CET encryption by ensuring the transformation quality of the information block. *13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, October 13–15, 2023, Athens, Greece, 2023, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/DESSERT61349.2023.10416546>.
19. Yasmin N., Gupta R. Modified lightweight cryptography scheme and its applications in IoT environment. *Int. j. inf. tecnol.* 2023, 15, pp. 4403–4414. <https://doi.org/10.1007/s41870-023-01486-2>
20. Zakaria A., Azni A., Ridzuan F., Zakaria N., Maslina H. Daud Systematic literature review: Trend analysis on the design of lightweight block cipher. *IEEE Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, 2023. Vol. 35, Is. 5, 101550. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2023.04.003>

УДК 004

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.29>**Андрій СЕРГАЧОВ**

магістр кафедри Спеціалізованих комп'ютерних систем,
Навчально-наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет»,
Український державний університет науки і технологій, a.serhachov@gmail.com
ORCID: 0009-0001-9344-3390

Денис ДУБОВИК

кандидат технічних наук, IT expert KIVI MEDIA, denic3d@gmail.com
ORCID: 0000-0002-8983-0646

Тетяна ДУБОВИК

старший викладач кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем,
Навчально-наукового інституту «Український державний хіміко-технологічний університет»,
Український державний університет науки і технологій, tetyana_dubovik@udhtu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-2359-2569

РОЗРОБКА СПЕЦІАЛІЗОВАНОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ НА БАЗІ ARDUINO UNO «РОЗУМНА» АВТОПАРКОВКА

Анотація. У даній статті представлено розробку спеціалізованої комп'ютерної системи на базі **Arduino Uno**, яка буде включати кілька важливих компонентів для створення ефективного та зручного інструменту для паркування. Система включатиме веб-сторінку, на якій користувачі зможуть забронювати вільне паркувальне місце. Це дозволить зменшити час на пошук вільного місця, а також знизить ймовірність неправильного паркування.

Метою цього проекту є розробка та впровадження розумного паркомату, який зможе автоматизувати процеси бронювання, оплати та контролю за паркувальними місцями, а також покращити ефективність використання наявних паркувальних ресурсів.

Практичне значення цієї розробки полягає в автоматичному контролі за паркувальними місцями. Для цього використовуються потужні алгоритми машинного навчання з автоматичним розпізнаванням тексту на номерних знаках, що дозволяє швидко та точно ідентифікувати транспортні засоби в реальному часі.

Методологія. На основі технології **TensorFlow** використовується камера, яка здійснюватиме зчитування номерних знаків автомобілів. Завдяки цьому паркомат зможе автоматично фіксувати автомобіль, що зайняв місце, і в реальному часі оновлювати статус доступності місця в системі. Для зберігання та обробки інформації про бронювання, доступність місць та транзакції користувачів буде створена база даних, що забезпечить надійне зберігання даних і дозволить забезпечити зручний доступ до інформації. **Arduino Uno**, завдяки своїй доступності, простоті та широким можливостям для інтеграції з різними датчиками та модулями, є ідеальним вибором для реалізації такого проекту. Інтеграція веб-сторінки для бронювання, розпізнавання номерних знаків за допомогою **TensorFlow** та база даних для обробки інформації дозволить створити ефективну систему, яка значно покращить процес паркування.

Актуальність такої розробки як «розумне» паркування авто, полягає в зростаючому попиті на гнучкі роботизовані систем зі штучним інтелектом, які можна адаптувати під різні сфери застосування.

Ключові слова: комп'ютерний зір, паркувальні місця, **Arduino Uno**, **TensorFlow**, веб-сторінки, розпізнавання авто.

Andrii SERHACHOV, Denys DUBOVYK, Tetiana DUBOVYK. DEVELOPMENT OF A SPECIALIZED COMPUTER SYSTEM BASED ON ARDUINO UNO «SMART» CAR PARKING

Abstract. This article presents the development of a specialized computer system based on **Arduino Uno**, which will include several important components to create an efficient and convenient parking tool. The system will include a web page where users can book a free parking space. This will reduce the time spent searching for a free space, as well as reduce the likelihood of improper parking.

The goal of this project is to develop and implement a smart parking meter that will be able to automate the processes of booking, payment and control of parking spaces, as well as improve the efficiency of the use of available parking resources.

The practical significance of this development lies in the automatic control of parking spaces. To do this, powerful machine learning algorithms with automatic text recognition on license plates are used, allowing for quick and accurate identification of vehicles in real time.

Methodology. Based on **TensorFlow** technology, a camera is used that will read car license plates. Thanks to this, the parking meter will be able to automatically record the car that has taken a seat and update the status of space availability in the system in real time. A database will be created to store and process information about reservations, seat availability and user transactions, which will ensure reliable data storage and provide convenient access to information. **Arduino Uno**, due to its affordability, simplicity and wide possibilities for integration with various sensors and modules, is an ideal choice for the implementation of such a project. The integration of a web page for booking, license plate recognition with **TensorFlow** and a database for processing information will allow you to create an effective system that will significantly improve the parking process.

The relevance of such a development as "smart" car parking lies in the growing demand for flexible robotic systems with artificial intelligence that can be adapted to different applications.

Key words: computer vision, parking spaces, **Arduino Uno**, **TensorFlow**, web pages, car recognition.

Аналіз досліджень та публікацій. В роботі [2] представлені розумні авто парковки. Автор пропонує LoRa система інтелектуальної парковки від українського системного інтегратора iotji своєчасно повідомляє про зайнятість чи вакантність паркувальних місць, спрощує для водіїв навігацію та пошук. В свою чергу, власник розумної парковки отримує ефективну систему моніторингу навантаженості об'єкта, а також – можливість інтегрувати свою систему у мережу розумного міста.

В роботі [5] автор демонструє інноваційну систему паркування без водія Ford показав інноваційну систему паркування без водія, яка полягає в тому, що припаркувати автівку до гаража або на паркувальне місце можна лише за допомогою смартфона. Коли буде потрібно виїхати, автомобіліст дасть команду машині з того ж смартфона, після чого вона під'їде до вказаного місця.

В роботі [11] UI/UX-кейс: автоматизація автопарковки в аеропорту автор пропонує швидке та зручне бронювання паркомісць, доповнює розробку датчиків. Датчик являє собою невеликий пристрій, який кріпиться до підлоги на кожне паркувальне місце. Відповідно, після того, як автомобіль стоїть на місці, система автоматично розуміє, що він зайнятий. Після цього бронювання автоматично переходить в етап «Автомобіль припаркований». Тобто датчик значно спрощує процес прийому та видачі авто.

Виклад основного матеріалу. Розроблений прототип спеціалізованої комп'ютерної системи «розумної» автопарковки оснащений мікроконтролером Arduino UNO [4], сервоприводом, LED – індикатором, датчиком руху, камерою та комп'ютером. Комп'ютер виступає в якості вебсервера, сервера збереження даних та сервера обробки відеопотоку.

Підключення мікроконтролера Arduino UNO з периферійними пристроями відбувається за допомогою з'єднувальних дрітків та макетної плати (рис. 1), подається напруга для компонентів: сервопривід SG90, LED – індикатор TM1637, датчик руху HC-SR501, та підключення сигнального піну 2, 3, 9 відповідно.

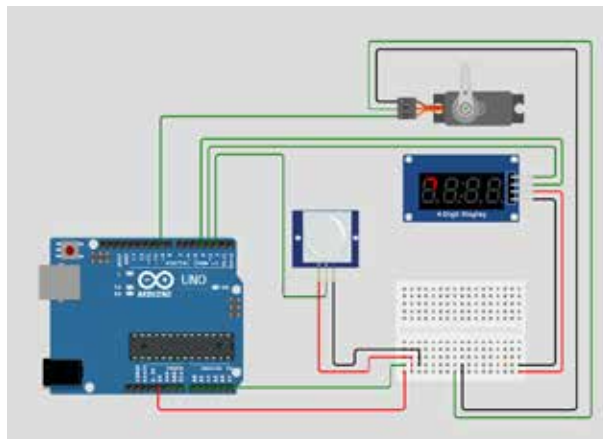


Рис. 1. Загальна схема підключення

Фрагмент коду програми:

Лістинг 1 – Текст файлу «arduino.ino»

```
#include <Servo.h>
#include <TM1637Display.h>
const int pirPin = 2;
const int servoPin = 9;
const int clkPin = 3;
const int dioPin = 4;
Servo myServo;
TM1637Display display(clkPin, dioPin);
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(pirPin, INPUT);
  myServo.attach(servoPin);
  myServo.write(0);
}
```

```

    display.setBrightness(0x0f);
  }
  void loop() {
    int motionDetected = digitalRead(pirPin);
    if (motionDetected == HIGH) {
      Serial.println(1);
      delay(10000);
    }
    if (Serial.available() > 0) {
      int receivedValue = Serial.parseInt();
      if (receivedValue > 0) {
        myServo.write(90);
        delay(10000);
        myServo.write(0);
        int hours = receivedValue / 60;
        int minutes = receivedValue % 60;
        display.showNumberDecEx(hours * 100 + minutes, 0x40, true);
        delay(2000); // Display the time for 2 seconds
      }
    }
  }
}

```

За допомогою Node.js було створено вебсайт [6] (рис. 2), який дозволяє водіям здійснювати бронювання паркомісць. Цей сайт забезпечує зручний інтерфейс, де користувачі можуть швидко знайти вільні паркувальні місця, забронювати місце на необхідний час. Завдяки використанню технології Node.js, система працює ефективно і швидко, забезпечуючи миттєву обробку запитів на бронювання. На сайті водії можуть також перевіряти наявність паркомісць у реальному часі, що дозволяє їм планувати свою поїздку більш зручно і без зайвих непорозумінь. Крім того, сайт дозволяє зберігати історію бронювань, що дає змогу користувачам легко переглядати свої попередні резерви та зручно планувати наступні. Використання Node.js дозволяє масштабувати систему для обробки великої кількості одночасних користувачів, забезпечуючи стабільність і високу швидкість роботи сайту навіть при великих навантаженнях.

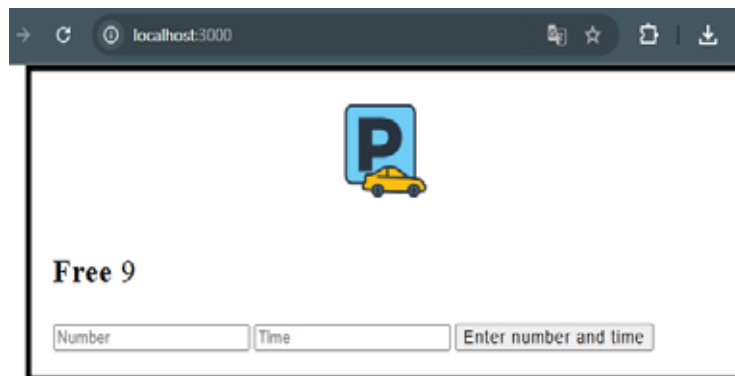


Рис. 2. Вебсайт

Фрагмент коду програми:

Лістинг 2 – Текст файлу «server.js»

```

const express = require('express');
const fs = require('fs');
const path = require('path');
const bodyParser = require('body-parser');
const app = express();
const port = 3000;
app.use(bodyParser.json());

```

```

app.set('view engine', 'ejs');
app.set('views', path.join(__dirname, 'views'));
app.use(express.static(path.join(__dirname, 'public')));
app.get('/', (req, res) => {
    fs.readFile(path.join('D:/parking/db/counter.txt'), 'utf8', (err, data) => {
        if (err) {
            res.status(500).send('Error reading file');
            return;
        }
    })
})

```

Було розроблено систему комп'ютерного зору [10] (рис. 3), яка здатна зчитувати номерні знаки автомобілів за допомогою технології TensorFlow. Ця система використовує потужні алгоритми машинного навчання для автоматичного розпізнавання тексту на номерних знаках, що дозволяє швидко та точно ідентифікувати транспортні засоби в реальному часі.

Завдяки використанню TensorFlow, система навчається на великих наборах даних, що дозволяє їй враховувати різні умови освітлення, кути зйомки та варіації в дизайні номерних знаків. Це дозволяє значно підвищити точність і надійність розпізнавання навіть у складних умовах, таких як погана видимість чи високий рівень динаміки.

```

output, from_logits = _get_logits(
+ [1m844/844+ [0m + [32m-----+ [0m+ [37m+ [0m + [1m9s+ [0m 9ms/step - accuracy: 0.8774 - loss: 0.4050 - val_accu
ary: 0.9833 - val_loss: 0.0659
Epoch 2/5
+ [1m844/844+ [0m + [32m-----+ [0m+ [37m+ [0m + [1m7s+ [0m 9ms/step - accuracy: 0.9834 - loss: 0.0555 - val_accu
ary: 0.9880 - val_loss: 0.0440
Epoch 3/5
+ [1m844/844+ [0m + [32m-----+ [0m+ [37m+ [0m + [1m7s+ [0m 9ms/step - accuracy: 0.9886 - loss: 0.0357 - val_accu
ary: 0.9895 - val_loss: 0.0405
Epoch 4/5
+ [1m844/844+ [0m + [32m-----+ [0m+ [37m+ [0m + [1m7s+ [0m 9ms/step - accuracy: 0.9912 - loss: 0.0258 - val_accu
ary: 0.9885 - val_loss: 0.0380
Epoch 5/5
+ [1m844/844+ [0m + [32m-----+ [0m+ [37m+ [0m + [1m7s+ [0m 9ms/step - accuracy: 0.9941 - loss: 0.0191 - val_accu
ary: 0.9893 - val_loss: 0.0380
313/313 - 1s - 2ms/step - accuracy: 0.9905 - loss: 0.0297

```

Рис. 3. Тренування комп'ютерного зору

Фрагмент коду програми:

Лістинг 3 – Текст файлу «camera.py»

```

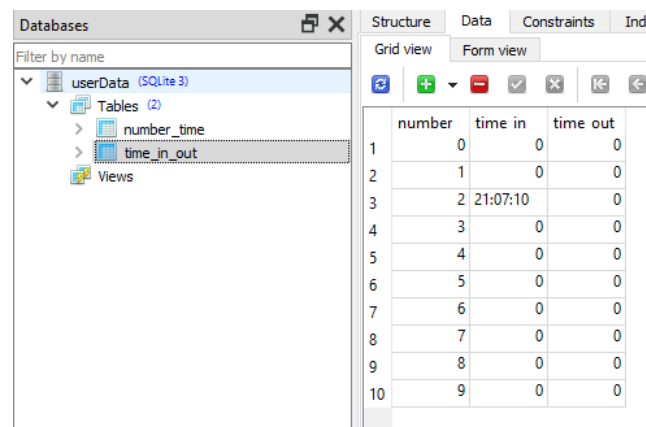
import cv2
import tensorflow as tf
import numpy as np
import os
import matplotlib.pyplot as plt
import re
serial = 'db/serial.txt'
predicted_file = 'db/predicted_number.txt'
signal= 0
mnist = tf.keras.datasets.mnist
(x_train, y_train), (x_test, y_test) = mnist.load_data()
x_train, x_test = x_train / 255.0, x_test / 255.0
x_train = x_train.reshape((x_train.shape[0], 28, 28, 1))
x_test = x_test.reshape((x_test.shape[0], 28, 28, 1))
model = tf.keras.models.Sequential([
    tf.keras.layers.Reshape((28, 28, 1), input_shape=(28, 28)), # Reshape for CNN
    tf.keras.layers.Conv2D(32, (3, 3), activation='relu'),
    tf.keras.layers.MaxPooling2D((2, 2)),
    tf.keras.layers.Conv2D(64, (3, 3), activation='relu'),
    tf.keras.layers.MaxPooling2D((2, 2)),
    tf.keras.layers.Flatten(),

```

```
tf.keras.layers.Dense(128, activation='relu'),
#tf.keras.layers.Dropout(0.5),
tf.keras.layers.Dense(10, activation='softmax')
])
```

Було розроблено базу даних [9] (рис. 4), в якій зберігається інформація про номер автомобіля, заброньований час, а також історія бронювань. Ця база даних організована таким чином, щоб забезпечити ефективне збереження, оновлення та доступ до даних, що дозволяє швидко обробляти запити від користувачів та системи. Кожен запис у базі містить номер автомобіля, дату і час, коли було здійснено бронювання, а також історичну інформацію про попередні бронювання цього ж автомобіля. Завдяки такій структурі дані про бронювання зберігаються в зручному вигляді, що дозволяє легко відслідковувати всі попередні запити та планувати майбутні резерви.

База даних також дозволяє відстежувати актуальний статус кожного паркомісця в реальному часі, що важливо для управління паркуванням. Інтерфейс системи забезпечує доступ до історії всіх бронювань, дозволяючи адміністраторам або користувачам переглядати та керувати записами, коригувати час бронювання або скасовувати попередні резервації. Завдяки цій базі даних, процес бронювання паркомісць став більш зручним та ефективним, а також забезпечує прозорість і надійність управління системою паркування.



	number	time in	time out
1	0	0	0
2	1	0	0
3	2	21:07:10	0
4	3	0	0
5	4	0	0
6	5	0	0
7	6	0	0
8	7	0	0
9	8	0	0
10	9	0	0

Рис. 4. База даних SQLite

Розроблена основна програма розумної автопарковки, яка сполучає та забезпечує взаємодію між усіма компонентами системи: вебсайтом, комп'ютерним зором, базою даних та Arduino Uno. Ця програма виконує роль центрального елемента, який координує роботу кожного з компонентів, гарантуючи їх ефективну взаємодію. Вебсайт служить інтерфейсом для користувачів, де водії можуть здійснювати бронювання паркомісць. Основна програма обробляє запити, отримані через вебсайт, передає їх до бази даних для збереження інформації про бронювання та забезпечує актуальність статусу паркувальних місць. Комп'ютерний зір, заснований на технології TensorFlow, здійснює розпізнавання номерних знаків автомобілів, що дозволяє ідентифікувати транспортні засоби та перевіряти їх наявність бронювання. Програма обробляє зображення, отримані від камер, і передає результати розпізнавання в базу даних для подальшої обробки та перевірки. База даних зберігає всю інформацію про заброньовані паркомісця, номери автомобілів та історію бронювань, що дає змогу ефективно управляти паркувальним процесом. Водночас, система Arduino Uno відповідає за контроль фізичних паркувальних місць, відкриваючи або блокуючи доступ до них залежно від статусу бронювання. Завдяки такій інтеграції всіх компонентів, програма забезпечує безперебійну роботу розумної парковки, ефективно обробляючи запити користувачів, виконуючи автоматичне розпізнавання транспортних засобів, зберігаючи історію бронювань і забезпечуючи автоматизований доступ до паркувальних місць.

Фрагмент коду програми:

Лістинг 4 – Текст файлу «userData.db»

```
import sqlite3
from datetime import datetime
import re
```

```

import time
import numpy as np
import os
import serial
ser = serial.Serial('COM4', 9600)
conn = sqlite3.connect('db/userData.db')
cursor = conn.cursor()
output = 'db/output.txt'
counter = 'db/counter.txt'
predicted_file = 'db/predicted_number.txt'
serial1 = 'db/serial.txt'
def create_table():
    cursor.execute('''
        CREATE TABLE IF NOT EXISTS number_time (
            number INTEGER,
            time INTEGER
        )
    ''')

```

Розпізнавання номеру здійснюється за допомогою моделі глибокого навчання, тренованої на даних з набору MNIST [3].

Завантаження та підготовка даних включає використання набору даних MNIST, який містить зображення цифр від 0 до 9. Зображення розміром 28x28 пікселів нормалізуються, приводячи значення пікселів до діапазону [0, 1]. Дані перетворюються в 4D формат з формою (num_samples, 28, 28, 1), де num_samples – кількість зразків, 28x28 – розміри зображень, 1 – кількість каналів (чорно-білі зображення).

Моделі нейронної мережі складається з кількох типів шарів: конволюційних шарів (Conv2D), що дозволяють витягувати ознаки з зображень, шарів зниження розміру (MaxPooling2D), що зменшують розміри зображень, шарів для перетворення векторів (Flatten), що перетворюють багатовимірні дані у 1D вектор, і повнозв'язних шарів (Dense), що виконують класифікацію на основі отриманих ознак. Моделі компілюється за допомогою оптимізатора Adam та функції втрат SparseCategoricalCrossentropy, яка підходить для багатокласової класифікації.

Моделі тренується на даних x_train та y_train, де x_train – зображення, а y_train – відповідні етикетки (цифри). Процес навчання триває протягом 5 епох з розміром пакета 64.

Для розпізнавання цифри в реальному часі використовується відеопотік з камери. Кожен кадр обробляється, на ньому зображається прямокутник, що обмежує область для розпізнавання цифри. Кадр обрізається, конвертується у відтінки сірого та змінюється до розміру 28x28 пікселів. Зображення інвертується та передається в модель для прогнозування [1].

Моделі визначає ймовірності для кожної цифри (від 0 до 9) та виводить на екран цифру з найбільшою ймовірністю (рис. 5).



Рис. 5. Тестування розробки

Результати натуральних іспитів. Підключений до мікроконтролера датчик руху виявляє зміну положення об'єктів у своєму полі зору, після чого мікроконтролер Arduino Uno передає сигнал на сервер. Отримавши сигнал основна програма на сервері запускає програму розпізнавання цифр, результат порівнює з базою даних, що містить дані, отримані з вебсайту. У випадку, якщо в базі даних знайдена відповідність між розпізнаною цифрою та спланим часом, комп'ютер передає сигнал до мікроконтролера Arduino Uno, який в свою чергу відображає інформацію про залишковий час на LED-індикаторі та активує сервопривід. Тестування системи здійснювалося за різних умов, результати якості розпізнавання цифри (0-9) представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Точність розпізнавання цифри (0-9)

Освітлення	Положення	Якість зображення	Точність (%)
Нормальне	Центр	Висока	98-100
Темне	Центр	Висока	85-90
Яскраве	Центр	Висока	95-98
Нормальне	Верхній правий кут	Висока	85-90
Нормальне	Лівий нижній кут	Висока	85-90
Нормальне	Центр (обертання 45°)	Висока	80-85
Нормальне	Центр	Низька (шум)	70-75
Темне	Центр	Низька	60-70
Нормальне	Центр (обертання 90°)	Висока	70-80

Висновки. Проведено всебічний аналіз теми розробки спеціалізованої комп'ютерної системи на базі Arduino Uno розумна автопарковка: визначено технічні та функціональні вимоги до розумного паркомату та описано можливості використання платформи Arduino Uno для реалізації проекту [7-8].

Проектування апаратної частини: розроблено схему підключення компонентів, включаючи камеру для зчитування номерів автомобілів; спроектовано систему для зчитування номерних знаків за допомогою TensorFlow. Розроблено програмне забезпечення для Arduino Uno (для обробки сигналів від датчиків і камери). Реалізовано функціонал для зчитування даних про наявність паркувальних місць. Розроблено взаємодію між Arduino та іншими модулями системи.

Розробка веб-сторінки для бронювання паркувальних місць:

- Створено веб-інтерфейс для користувачів, на якому вони зможуть бронювати вільні паркувальні місця.

- Реалізовано функціонал для перегляду статусу доступних місць у реальному часі.

- Забезпечено інтеграцію веб-сторінки з базою даних для зберігання інформації про бронювання.

Розпізнавання номерних знаків за допомогою TensorFlow:

- Навчено модель на основі TensorFlow для розпізнавання номерних знаків.

- Інтегровано модель у систему для автоматичного визначення автомобілів, що паркуються, та оновлення статусу місць.

Розробка та інтеграція бази даних: створено базу даних для зберігання інформації про користувачів, паркувальні місця, бронювання та транзакції; реалізовано механізм взаємодії між базою даних і іншими компонентами системи.

Виконання цих завдань дозволило створити повноцінну автоматизовану систему паркування, яка значно спрощує процес бронювання та контролю за паркувальними місцями, підвищує ефективність використання інфраструктури та зручність для користувачів.

Дана розробка є прикладом того, як можна поєднати різні технології у єдиній теоретичній моделі. Наголошено на важливості теоретичного підходу в розробці інноваційних рішень, які можуть бути реалізовані в практичному контексті в майбутньому.

Перспективи. В даний час розроблена система актуальна, та має перспективу на модернізацію та удосконалення. Може бути використана в різних сферах, де затребувана роботизація виробництва – автопаркування, тощо.

Список використаних джерел:

1. Дубовик Т. Комп'ютерна система розпізнавання облич (2025). Agriculture, technical and applied sciences: main problems and solutions Collective monograph. Published by Primedia eLaunch, Boston 2025, С. 305–324
2. Розумні авто парковки: URL: <https://iotji.io/ru/solutions/umnuye-parkovki/> (дата звернення 20.01.2025)

3. Abadi M., Agarwal A., Barham P., Brevdo E., Chen Z., Citro C., Zheng X. TensorFlow: Large-scale machine learning on heterogeneous systems. arXiv preprint arXiv:1603.04467. 2016. URL: <https://arxiv.org/abs/1603.04467> (дата звернення 21.01.2025)
4. Arduino, Inc. (2021). Arduino UNO Rev3. URL: <https://www.docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/> (дата звернення 21.01.2025)
5. Ford показав інноваційну систему паркування без водія : URL: <https://tsn.ua/auto/news/ford-pokazav-innovaciynu-sistemu-parkuvannya-bez-vodiya-video-1616704.html> (дата звернення 21.01.2025)
6. Node.js. (n.d.). Node.js®: JavaScript runtime built on Chrome's V8 JavaScript engine: URL: <https://nodejs.org/> (дата звернення 21.01.2025)
7. Sergeyeva O., Lisenko V., Dubovik T., Patalakha M. "Development of a Wi-Fi controlled mobile video device on the Arduino NANO basis", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020. Vol. 3/9 (105), 55–60, DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.206558> (дата звернення 21.01.2025)
8. Sergeyeva O. V., Robuck E. A., Pavlenko N. Y., Dubovik T. N. Applications of computer systems based on the Arduino microprocessor system in chemical laboratory. The Eurasian Union of Scientists (ESU), 2019. 12 (69 (5)), 34–38.
9. SQLite. (n.d.). SQLite Documentation: URL: <https://www.sqlite.org/docs.html> (дата звернення 21.01.2025)
10. TensorFlow. (n.d.). TensorFlow: An Open Source Machine Learning Framework for Everyone: URL: <https://www.tensorflow.org/> (дата звернення 21.01.2025)
11. UI/UX-кейс: автоматизація парковок в аеропорту: URL: <https://ux.pub/editorial/uiux-kieis-avtomatizatsiia-parkovok-v-aeroportu-5dgh> (дата звернення 21.01.2025)

УДК 004.94:007

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.30>**Тарас СКИЦЬКИЙ**

аспірант, Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет»

ORCID: 0009-0007-7411-1861

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОСТОРОВИХ ОБЧИСЛЕНЬ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ У ПРИКЛАДНИХ ГАЛУЗЯХ

Анотація. Стаття присвячена просторовим обчисленням – сучасній технології, яка дозволяє інтегрувати цифрову інформацію та віртуальний контент у фізичний світ, відкриваючи нові можливості для взаємодії та аналізу даних. У статті розглянуто історію розвитку просторових обчислень, починаючи з 1960-х років, коли Айвен Сазерленд представив концепцію «Sketchpad», одного з перших графічних інтерфейсів. Значний прорив у технологіях стався в 1980-х роках завдяки розвитку віртуальної реальності (VR) та пристроїв для занурення користувачів, а у 2010-х роках – завдяки поширенню доповненої реальності (AR) у мобільних пристроях.

Ця стаття визначає основні концепції та термінологію просторових обчислень, зокрема віртуальної, доповненої, змішаної та розширеної реальностей (VR, AR, MR, XR). Розглянуто ключові технології, які дозволяють інтегрувати цифровий контент у фізичне середовище: комп'ютерне бачення, системи відстеження руху та відображення просторових даних. Було визначено ключові пристрої, які допомогли розвитку галузі, зокрема Microsoft HoloLens та Apple Vision Pro.

Окремо проаналізовано застосування просторових обчислень, а саме в галузях освіти, медицини, промисловості, військової сфери та туризму. В освіті просторові обчислення сприяють створенню інтерактивних навчальних середовищ, особливо для дослідження природничих та технічних дисциплін. У медицині ця технологія використовується для імітації хірургічних операцій, лікування фантомного болю в кінцівках та реабілітації пацієнтів. У виробництві та дизайні просторові обчислення допомагають створювати 3D-прототипи, а у військовій справі вони використовуються для навчання солдат і стратегічного планування місій.

У статті також висвітлюються проблеми, пов'язані з використанням просторових обчислень, зокрема високі технічні вимоги, кіберхвороба, обмежене поле зору, надмірне когнітивне навантаження на користувача та висока вартість обладнання.

У висновках підкреслена необхідність подальших досліджень для зниження вартості технологій, розробки ефективних алгоритмів для взаємодії з просторовими середовищами та інтеграції машинного навчання для обробки великих обсягів даних. Просторові обчислення мають потенціал кардинально змінити спосіб взаємодії з цифровим світом, але для їх повноцінної реалізації потрібно подолати технологічні та соціальні бар'єри.

Метою роботи є проаналізувати розвиток сучасних підходів до просторових обчислень, оцінити поточний стан і перспективи розвитку просторових обчислень, особливо їх вплив на різні галузі, такі як освіта, медицина, виробництво та військова справа, а також можливості інтеграції цих технологій для інклюзивного та етичного використання.

Наукова новизна дослідження полягає в комплексному аналізі сучасного стану просторових обчислень, що дозволяє систематизувати етапи їхнього розвитку. Особлива увага приділена можливості інтеграції доповненої, віртуальної та змішаної реальності в освітні, медичні та виробничі процеси.

Ключові слова: просторові обчислення, доповнена реальність, віртуальна реальність, змішана реальність, інтерактивні середовища.

Taras SKYTSKYI. ANALYSIS OF THE CURRENT STATE AND APPLICATIONS OF SPATIAL COMPUTING ACROSS VARIOUS FIELDS

Abstract. The article explores spatial computing, an advanced technology that enables the integration of digital information and virtual content into the physical world, opening new possibilities for interaction and data analysis. The article explores the history of spatial computing development, starting from the 1960s when Ivan Sutherland introduced the concept of Sketchpad, one of the first graphical interfaces. A significant technological breakthrough occurred in the 1980s with the development of virtual reality (VR) and immersive devices, and in the 2010s, with the widespread adoption of augmented reality (AR) in mobile devices.

This article defines the key concepts and terminology of spatial computing, including virtual reality, augmented reality, mixed reality, and extended reality (VR, AR, MR, XR). The study examines core technologies that enable the integration of digital content into the physical environment, such as computer vision, motion tracking systems, and spatial data visualization. Key devices that contributed to the industry's advancement, including Microsoft HoloLens and Apple Vision Pro, are also highlighted.

The application of spatial computing is analyzed separately across various fields, including education, medicine, industry, the military sector, and tourism. In education, spatial computing facilitates the creation of interactive learning environments, particularly for exploring natural sciences and technical disciplines. In medicine, this technology is used for simulating surgical procedures, treating phantom limb pain, and rehabilitating patients. In manufacturing and design, spatial computing aids in creating 3D prototypes, while in the military sector, it is utilized for training soldiers and strategic mission planning.

The article also addresses the challenges associated with spatial computing, such as high technical requirements, cybersickness, limited field of view, significant cognitive load on users, and the high cost of equipment.

The conclusions emphasize the necessity of further research to reduce technology costs, develop effective interaction algorithms for spatial environments, and integrate machine learning for processing large volumes of data. Spatial computing

has the potential to fundamentally transform how people interact with the digital world, but overcoming technological and social barriers is essential for its full implementation.

Key words: spatial computing, augmented reality, virtual reality, mixed reality, interactive environments.

Виклад основного матеріалу. Просторові обчислення почали зароджуватись у 1960-х роках, коли взаємодія між комп'ютерами та користувачами була обмежена командними рядками. Американський науковець Айвен Сазерленд зробив революційний внесок у цю сферу, представивши у 1963 році концепцію «Sketchpad» – один з перших графічних інтерфейсів. Ця комп'ютерна програма дозволяла користувачам малювати та маніпулювати зображеннями на екрані за допомогою світлового пера, тобто безпосередньо, а не шляхом введення командних інструкцій. Хоча «Sketchpad» заклав основу сучасної взаємодії людини та комп'ютера, це був лише початок глибоких технологічних розробок.

У 1980-х роках віртуальна реальність (VR) почала інтенсивно розвиватись завдяки зусиллям Джарона Ланье та його компанії VPL Research. Поява наголовних дисплеїв (HMD) і рукавичок для обробки даних створила новий рівень занурення користувачів, забезпечуючи інтерактивність і відчуття реальності.

На початку 1990-х років термін «доповнена реальність» (AR) почав з'являтися в академічних і технологічних дискусіях, хоча справжній розквіт AR настав лише в 2010-х роках з поширенням смартфонів і планшетів. Наприклад, додаток Pokémon Go у 2016 році продемонстрував потенціал поєднання цифрових елементів із реальним світом, забезпечуючи мільйонам користувачів інтерактивний та захоплюючий досвід. Гра засвідчила й інтерес людей до цієї технології, від моменту виходу додатку його завантажили 500 мільйонів разів лише за перші три місяці.

У 2016 році компанія Microsoft зробила значний прорив, представивши HoloLens – революційний пристрій змішаної реальності (MR). Справжня інновація цієї гарнітури полягала в тому, що вона поєднувала в одному автономному і портативному пристрої кілька передових технологій: набір сенсорів, в тому числі камери глибини та інерційні вимірювальні блоки (IMU) для створення тривимірної карти оточення; голографічний процесор (HPU) для обробки даних з сенсорів у реальному часі; управління жестами, голосом та відстеження погляду. Завдяки HoloLens просторова доповнена реальність знайшла багато практичних застосувань в архітектурі, інженерії та освіті [1].

Новий поштовх для розвитку просторових обчислень відбувся у 2023 році з випуском окулярів Apple Vision Pro, які поєднують у собі можливості AR, VR та MR. Цей пристрій відкрив нові горизонти для інтеграції технологій у повсякденне життя та професійну сферу [2, с. 1–2].

Дорожня карта розвитку просторових обчислень за останні десятиліття показана на Рис. 1.



Рис. 1. Дорожня карта розвитку просторових обчислень

Також необхідно розглянути економічний аспект просторових обчислень. У 2022 році світовий ринок просторових обчислень оцінювався в 102,5 мільярда доларів США, а сукупний річний темп зростання (CAGR) з 2023 по 2030 рік становитиме за прогнозами 20,4%. Ключовими факторами, що сприяють цьому зростанню є величезний попит на технології занурення, інновації в апаратному та програмному забезпеченні, а також широке впровадження в різних галузях. Інвестиції та фінансування технологічних стартапів також сприяють зростанню цього сектору [3].

Концепція та ключові технології. Просторові обчислення – це використання технологій, які інтегрують цифрову інформацію та віртуальний контент у фізичний світ, дозволяючи користувачам взаємодіяти з цифровим контентом у просторовому контексті [4].

Цей термін включає віртуальну реальність (VR) та доповнену реальність (AR), а також пов'язані концепції, такі як змішана реальність (MR) й розширена реальність (XR). Просторові обчислення поєднують реальний та віртуальний світи, дозволяючи користувачам сприймати цифровий контент й взаємодіяти з ним у реальному середовищі. Для створення безшовної інтеграції між цифровими та фізичними елементами використовуються технології комп'ютерного бачення, датчики та системи відстеження рухів й місця розташування користувача та просторове відображення отриманих даних [5, с. 131–132].

Віртуальна реальність (VR) спрямована на створення захоплюючого цифрового досвіду шляхом моделювання віртуального середовища, з яким користувачі можуть взаємодіяти за допомогою спеціальних пристроїв, наприклад, віртуальні гарнітури та окуляри. Ця технологія повністю замінює реальне середовище користувача, поміщаючи його в змодельоване комп'ютерне середовище. Таким чином, користувач відчуває, що перебуває в іншому світі, взаємодіючи з віртуальними об'єктами та просторами [6, с. 257–259].

Доповнена реальність (AR) передбачає накладання цифрової інформації, такої як зображення, відео або 3D-моделі, на реальний світ. Ця технологія покращує сприйняття реальності, додаючи віртуальні елементи, які взаємодіють із фізичним середовищем користувача. Технологію доповненої реальності можна використовувати на таких пристроях, як смартфони, планшети, розумні окуляри або наголовні дисплеї, що дозволяє користувачам сприймати віртуальний контент й взаємодіяти з ним, в той же час залишаючись в реальному світі [7, с. 216].

Змішана реальність (MR) інтегрує цифровий контент у реальний світ, забезпечуючи взаємодію між реальними та віртуальними елементами.

Розширена реальність (XR) – це широкий термін, який включає віртуальну реальність, доповнену реальність та змішану реальність.

На Рис. 2. представлено континуум віртуальності, безперервну шкалу, на якій представлено технології просторових обчислень, від повністю реального середовища (реальності) до повністю віртуального середовища (віртуальності). Ця концептуальна модель була вперше представлена Полом Мілграмом у 1994 році [8].

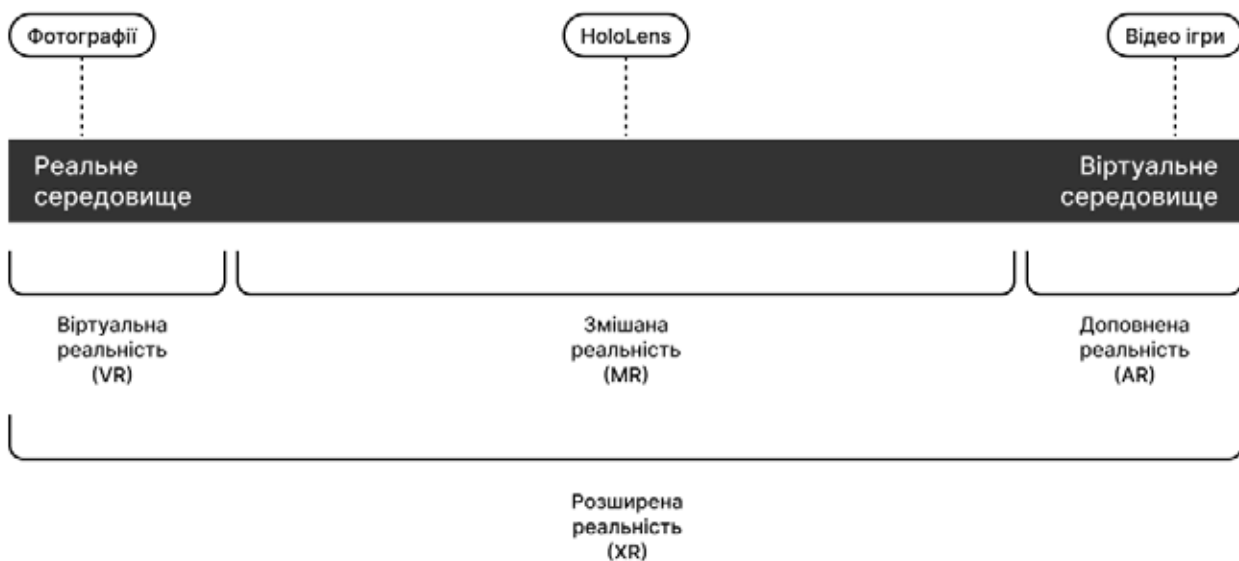


Рис. 2. Континуум віртуальності

Технології розширеної реальності, включаючи AR, VR і MR, відіграють життєво важливу роль у розвитку та просуванні просторових обчислень. Доповнена реальність накладає цифрову інформацію на реальне середовище, збагачуючи просторове розуміння. У контексті просторових обчислень доповнена реальність використовується для надання контекстної інформації про фізичні об'єкти чи місця, покращуючи тим самим ефект занурення. Доповнена реальність також полегшує просторову взаємодію, дозволяючи користувачам взаємодіяти з цифровими об'єктами в реальному світі за допомогою розпізнавання жестів, безконтактної взаємодії та просторово-орієнтованих інтерфейсів. Це особливо корисно для навігаційних програм у просторових обчисленнях, надаючи візуальні підказки та вказівки, накладені на реальний світ, спрощуючи складні навігаційні завдання [9].

Просторові обчислення використовують віртуальну реальність для різноманітних цілей, таких як навчальні симуляції, віртуальні тури (HoloTour – додаток для HoloLens, який переносить користувачів

у відомі місця світу у форматі 360-градусних віртуальних турів) та просторовий дизайн (IKEA Kreativ – додаток на основі штучного інтелекту, який дозволяє користувачам розставляти товари IKEA у власних помешканнях, використовуючи VR та просторові обчислення). Віртуальна реальність дає користувачам відчуття присутності, стаючи потужним інструментом для створення захоплюючих просторових вражень. Крім того, віртуальна реальність підтримує віртуальну співпрацю, дозволяючи географічно віддаленим людям працювати разом у спільному віртуальному просторі, що особливо корисно в таких галузях, як архітектура, інженерія та дизайн. Здатність віртуальної реальності візуалізовувати просторові дані та 3D-моделі покращує розуміння та аналіз просторової інформації.

Змішана реальність долає розрив між фізичним і цифровим світами, плавно поєднуючи обидва. У просторових обчисленнях змішана реальність використовується для поєднання цифрового контенту з реальним середовищем, створюючи захоплююче мультимедійне середовище. Пристрої змішаної реальності забезпечують взаємодію без використання рук, використовуючи управління жестами або ж поглядом, що полегшує взаємодію з просторовим контентом без потреби у фізичних контролерах.

Просторові обчислення дозволяють досліджувати цифровий контент у спосіб, який сумісний із когнітивними можливостями людини. Незалежно від того, чи йдеться про сторітеллінг, візуалізацію даних, математичні концепції чи надзвичайно великі або ж малі об'єкти, як галактики чи молекулярні структури, просторові обчислення створюють середовище, сприятливе для природної взаємодії. Цей «новий натуралізм» відповідає фізичним очікуванням людини, виходячи за межі сприйняття та фізичних можливостей.

3. Сфери застосування:

Освіта. Просторові обчислення відкривають нові горизонти для навчання. Наприклад, студенти можуть вивчати анатомію за допомогою 3D-моделей або здійснювати віртуальні екскурсії історичними місцями. Вплив тривимірного середовища сприяє реалістичному розумінню складних тем, особливо в галузях науки, технології, інженерії та математики (STEM), де просторові здібності є дуже важливими [10, 11]. Так, на уроці фізики студент може перевірити, чи працюють його формули побудови мосту в змодельованому середовищі.

Просторові обчислення вирізняються здатністю персоналізувати навчальний контент. Завдяки штучному інтелекту вчителі можуть планувати уроки на основі бажаного темпу та стилю навчання кожного учня. Крім того, досягнення в доповненій реальності, такі як Apple Vision Pro, можуть демократизувати освіту, розширюючи можливості навчання у віддалених місцях чи людей інвалідністю [12].

Медицина. Просторові обчислення пропонують нові методи лікування та навчання для медичних працівників. Наприклад, технологія віртуальної реальності використовується для моделювання хірургічних операцій, а доповнена реальність дозволяє візуалізувати внутрішні органи в реальному часі.

Відчуття присутності, досягнуте за допомогою віртуальної й доповненої реальності, може допомогти в експозиційній терапії деяких типів психологічних проблем, таких як фобії павуків чи тарганів [13, 14]. Інші застосування включають лікування фантомного болю в кінцівках за допомогою доповненої реальності [15], накладання голографічного зображення для підготовки до операцій [16] та реабілітацію рук після інсульту [17].

Просторові обчислення дозволяють хірургам використовувати голографічне зображення людського тіла, щоб відпрацьовувати хірургічні операції перед тим, як виконувати їх на пацієнтах, що підвищує точність і безпеку складних процедур. Згідно дослідження Федеральної політехнічної школи Лозанни (EPFL) VR-терапія покращує стан пацієнтів з паралічем, що страждають фантомними болями. Учасники відчувають ілюзію дотику до їхніх паралізованих ніг, що сприяє зниженню фантомного болю [18]. Зараз таку практику в Україні використовують в ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМНУ» для реабілітації поранених військових [19].

Виробництво. У виробничій галузі доповнена реальність допомагає працівникам виконувати складні завдання, накладаючи віртуальні інструкції на реальне виробниче середовище. Ці посібники частково можуть бути замінені системами доповненої реальності, які відображають ті самі інструкції та додають прив'язані до місцевості вказівки. Такі програми були розроблені для аерокосмічної [20] та харчової [21] галузей.

Інженери та дизайнери використовують змішану реальність для створення 3D-прототипів, що дозволяє значно зменшити вартість виготовлення фізичних моделей [22].

Військова справа. Система доповненої реальності Integrated Visual Augmentation System (IVAS), – розробка компанії Microsoft, що вдосконалила цивільні окуляри доповненої реальності HoloLens для військових цілей, – використовується для підготовки солдатів і планування місій для Збройних сил США. У 2024 році Microsoft інтегрувала в цю систему штучний інтелект, що дозволило автономно виявляти загрози та збільшити тактичну перевагу солдатів на полі бою [23]. Ізраїльські військові, зокрема,

використовували віртуальну реальність для моделювання бойових ситуацій, що значно підвищило ефективність їхніх дій [24].

Українська компанія Logics7 розробляє VR-симулятори, які дозволяють військовослужбовцям відпрацьовувати навички володіння ПЗРК Stinger, Piorun, «Ігла». Такі тренування вже пройшли понад 45 000 військових, серед яких ТрО, морська піхота, ГУР і ССО. Це дозволяє економити боєприпаси і зменшує зношування озброєння [25].

Туризм. Просторові обчислення використовуються для створення віртуальних турів або ж накладання гідів в доповненій реальності, які можуть проводити гостей готелем, надавати індивідуальні рекомендації й навіть допомагати візуалізувати план номерів [26].

Об'єкти культурної спадщини привертають до себе додаткову увагу завдяки технологіям, оскільки туристи мають змогу у доповненій реальності накладати зниклі пам'ятки або віртуальних мешканців відповідного періоду [27; 28]. Аналогічно, доповнену реальність використовують для розфарбовування археологічних артефактів [29]. Завдяки тактильному інтерфейсу ці артефакти також можна відчутти. Ця технологія використовувалася в музеях для створення ілюзії дотику до безцінних об'єктів, фізичний контакт з якими є неприпустимим [30].

Висновки. Аналіз поточного стану та розвитку просторових обчислень показав, що ця технологія є однією з найбільш інноваційних напрямків сучасної науки, що відкриває значні можливості для розвитку багатьох галузей. Просторові обчислення стали важливим інструментом для створення інтерактивного досвіду в медицині, освіті, виробництві, військовій справі та інших сферах. Вони забезпечують більшу точність, ефективність та персоналізацію процесів, створюючи нові підходи до вирішення складних проблем. Проте застосування просторових обчислень зіштовхується з певними викликами. Серед основних проблем виділяють:

- Обмежене поле зору, у якому можна відображати доповнену чи віртуальну реальність, та обмежений час роботи акумулятора є одними з головних технічних обмежень сучасних поколінь гарнітур. Сама конструкція гарнітури може бути причиною поганого досвіду користувача через додаткову вагу на голові користувача. Покращення ергономіки та фізичного дизайну пристрою може відігравати вирішальну роль у полегшенні сприйняття доповненої та віртуальної реальності.
- Кіберхвороба – сукупність симптомів, які відчуває користувач під час або після перебування в імєрсивному середовищі. Деякі користувачі відчувають зорове напруження або дезорієнтацію під час використання AR/VR пристроїв. Це фізіологічна реакція на незвичний сенсорний стимул, схожий на морську хворобу руху. Такі симптоми можуть обмежувати тривалість та частоту використання технологій.
- Величезний обсяг даних та інформації, створений цими системами, а також складні інтерфейси, відсутність просторових орієнтирів і сенсорне перенасичення можуть перевантажувати користувачів інформацією, внаслідок чого вони можуть відчувати розгубленість та мати труднощі у взаємодії з віртуальним середовищем.
- Висока вартість сучасних пристроїв для відтворення просторових обчислень може обмежити застосування цієї технології у всіх вищезгаданих галузях. Наприклад, два найсучасніших пристрої – HoloLens 2 від Microsoft і Apple Vision Pro – коштують близько 3500 доларів США кожен.
- Довговічність пристроїв для VR/AR. Розробникам шоломів потрібно буде посилити надійність адаптивних та погодостійких матеріалів для використання в екстремальних умовах експлуатації.
- Деякі пристрої можуть бути фізично незручними для людей з інвалідністю, а також можуть не враховувати сенсорні або когнітивні особливості певних користувачів, що обмежує їх доступ до цифрового середовища.

Майбутні дослідження повинні зосередитися на розробці більш доступного апаратного забезпечення, вдосконаленні алгоритмів для зменшення когнітивного навантаження та інтеграції машинного навчання для ефективної обробки великих обсягів даних. Також важливо розробити етичні стандарти для використання просторових обчислень у різних галузях.

Отже, просторові обчислення – це технологія, яка має потенціал трансформувати поточні методи взаємодії з цифровим та фізичним середовищем. Однак для повного впровадження цієї технології необхідно подолати існуючі проблеми та забезпечити етичне, доступне та безпечне впровадження просторових обчислень на практиці.

Список використаних джерел:

1. Evolution of spatial computing. URL: <https://www.travancoreanalytics.com/evolution-of-spatial-computing/> (date of access: 20.01.2025).
2. Waisberg E., Ong J., Masalkhi M., Zaman N., Sarker P., Lee A. G., Tavakkoli A. Apple vision pro and why extended reality will revolutionize the future of medicine. *Irish Journal of Medical Science*, 2024. P. 531–532. URL: <https://doi.org/10.1007/s11845-023-03437-z> (date of access: 20.01.2025).

3. Spatial Computing Market Report. URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/spatial-computing-market-report> (date of access: 20.01.2025).
4. Yenduri G., Ramalingam M., Maddikunta P.K., Gadekallu T.R., Jhaveri R.H., Bandi A., Chen J., Wang W., Shirawalmath A.A., Ravishankar R., Wang W. Spatial Computing: Concept, Applications, Challenges and Future Directions. *arXiv preprint*. 2024. URL: <https://arxiv.org/abs/2402.07912> (date of access: 20.01.2025).
5. Mohamed K. S. Deep learning for spatial computing: Augmented reality and metaverse “the digital universe”. *Deep Learning-Powered Technologies: Autonomous Driving, Artificial Intelligence of Things (AIoT), Augmented Reality, 5G Communications and Beyond*. Springer, 2023. P. 131–150. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-35737-4_4 (date of access: 20.01.2025).
6. Scavarelli A., Arya A., Teather R. J. Virtual reality and augmented reality in social learning spaces: a literature review. *Virtual reality*. 2020. URL: <https://doi.org/10.1007/s10055-020-00444-8> (date of access: 20.01.2025).
7. Xiong J., Hsiang E.-L., He Z., Zhan T., Wu S.-T. Augmented reality and virtual reality displays: emerging technologies and future perspectives. *Light: Science & Applications*. 2021. Vol. 10, No 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41377-021-00658-8> (date of access: 20.01.2025).
8. Milgram P., Takemura H., Utsumi A., Kishino F. Augmented Reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum. *Proceedings of SPIE 2351. Telemanipulator and Telepresence Technologies*. 1994. URL: <https://doi.org/10.1117/12.197321> (date of access: 20.01.2025).
9. Templin T., Popielarczyk D., Gryszko M. Using augmented and virtual reality (AR/VR) to support safe navigation on inland and coastal water zones. *Remote Sensing*. Vol. 14, No 6. 1520. URL: <https://doi.org/10.3390/rs14061520> (date of access: 20.01.2025).
10. The Promise of Immersive Learning: Augmented and Virtual Reality’s Potential in Education. *Information Technology and Innovation Foundation (ITIF)*. URL: <https://itif.org/publications/2021/08/30/promise-immersive-learning-augmented-and-virtual-reality-potential/> (date of access: 20.01.2025).
11. How Augmented Reality Is Changing the Way We Learn. *The New York Times*. URL: <https://www.nytimes.com/spotlight/augmented-reality> (date of access: 20.01.2025).
12. The Potential of Augmented Reality for Education. *eLearning Industry*. URL: <https://elearningindustry.com/augmented-reality-in-education-staggering-insight-into-future> (date of access: 20.01.2025).
13. Botella C. M., Juan M. C., Baños R. M., Alcañiz M., Guillén V., Rey B. Mixing realities? An application of augmented reality for the treatment of cockroach phobia. *CyberPsychology & Behavior*. 2005. Vol. 8, No 2. P. 162–171. URL: <https://doi.org/10.1089/cpb.2005.8.162> (date of access: 20.01.2025).
14. Juan M. C., Alcaniz M., Monserrat C., Botella C., Banos R. M., Guerrero B. Using augmented reality to treat phobias. *IEEE Computer Graphics and Applications*. 2005. Vol. 25, No 6. P. 31–37. URL: <https://doi.org/10.1109/mcg.2005.143> (date of access: 20.01.2025).
15. Carrino F., Rizzotti D., Gheorghe C., Kabasu Bakajika P., Francescotti-Paquier F., Mugellini E. Augmented reality treatment for phantom limb pain. *Virtual, Augmented and Mixed Reality. Applications of Virtual and Augmented Reality*. Cham, 2014. P. 248–257. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-07464-1_23 (date of access: 20.01.2025).
16. Fuchs, H., Livingston, M.A., Raskar, R., Colucci, D., Keller, K., State, A., Crawford, J.R., Rademacher, P., Drake, S.H., & Meyer, A.A. Augmented reality visualization for laparoscopic surgery. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI’98*. Berlin, Heidelberg, 1998. P. 934–943. URL: <https://doi.org/10.1007/bfb0056282> (date of access: 20.01.2025).
17. Mousavi Hondori H., Khademi M., Dodakian L., Cramer S. C., Lopes C. V. A spatial augmented reality rehab system for post-stroke hand rehabilitation. *Studies in Health Technology and Informatics*. 2013. Vol. 184. P. 279–285. URL: <http://dx.doi.org/10.3233/978-1-61499-209-7-279> (date of access: 20.01.2025).
18. Virtual Reality Reduces Phantom Pain in Paraplegics. *EPFL*. URL: <https://actu.epfl.ch/news/virtual-reality-reduces-phantom-pain-in-parapleg-5/> (date of access: 20.01.2025).
19. VR-терапія для реабілітації. *Рубрика*. URL: <https://rubryka.com/article/vr-terapiya-dlya-reabilitatsiyi/> (дата звернення: 20.01.2025).
20. Serván J., Mas F., Menéndez J. L., Ríos J. Assembly work instruction deployment using augmented reality. *Key Engineering Materials*. 2012. Vol. 502. P. 25–30. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.502.25> (date of access: 20.01.2025).
21. Re G. M., Bordegoni M. An augmented reality framework for supporting and monitoring operators during maintenance tasks. *Virtual, Augmented and Mixed Reality. Applications of Virtual and Augmented Reality*. Cham, 2014. P. 443–454. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-07464-1_41 (date of access: 20.01.2025).
22. Spatial Computing: Revolutionizing Industries with AI, AR, and VR Integration. *E-SPIN Group*. URL: <https://www.e-spincorp.com/spatial-computing-revolutionizing-industries-ai-ar-vr-integration/> (date of access: 20.01.2025).
23. Integration of IVAS, Anduril, and Microsoft Lattice for the Army. *DefenseScoop*. URL: <https://defensescoop.com/2024/09/19/ivas-anduril-microsoft-lattice-integration-army/> (date of access: 20.01.2025).
24. With Virtual Reality, Israeli Soldiers Train in Simulated Terror Tunnels. *The Times of Israel*. URL: <https://www.timesofisrael.com/with-virtual-reality-israeli-soldiers-train-in-simulated-terror-tunnels/> (date of access: 20.01.2025).
25. Українська компанія навчила 45 000 військових збивати “Шахеди”: як працюють VR і лазерні тренажери. *Liga.Tech*. URL: <https://tech.liga.net/ua/technology/article/ukrainska-kompaniia-navchyla-45-000-viiskovykh-zbyvaty-shakhedy-yak-pratsuiut-vr-i-lazerni-trenazhery> (дата звернення: 20.01.2025).
26. Spatial Computing: The New Frontier in Hospitality. *HospitalityNet*. URL: <https://www.hospitalitynet.org/opinion/4120267.html> (date of access: 20.01.2025).

27. Noh Z., Sunar M. S., Pan Z. A review on augmented reality for virtual heritage system. *Learning by Playing. Game-based Education System Design and Development*. 2009. P. 50–61. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-03364-3_7 (date of access: 20.01.2025).
28. Vlahakis V., Karigiannis J., Tsotros M., Gounaris M., Almeida L., Stricker D., Gleue T., Christou I. T., Carlucci R., Ioannidis N. Archeoguide: first results of an augmented reality, mobile computing system in cultural heritage sites. *Proceedings of the 2001 Conference on Virtual Reality, Archeology, and Cultural Heritage*. Glyfada, Greece: ACM, 2001. P. 131–140.
29. Ridel B. Techniques d'interaction, affichage personnalisé et reconstruction de surfaces pour la réalité augmentée spatiale : Dissertation de doctorat. Bordeaux, 2016. P. 44–46. URL: <http://www.theses.fr/2016BORD0149/document> (date d'accès: 20.01.2025).
30. Dima M., Hurcombe L., Wright M. Touching the past: haptic augmented reality for museum artefacts. *Virtual, Augmented and Mixed Reality. Applications of Virtual and Augmented Reality*. Cham, 2014. P. 3–14. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-07464-1_1 (date of access: 20.01.2025).

УДК 004.8

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.31>

Сергій СТАСЕВИЧ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри екологічної безпеки та природоохоронної діяльності,
Національний університет «Львівська політехніка», serhiy.p.stasevych@lpnu.ua
ORCID: 0000-0002-9985-9485

Олена ГОЛОДОВСЬКА

кандидат технічних наук,
асистент кафедри екологічної безпеки та природоохоронної діяльності
Національний університет «Львівська політехніка», olena.y.holodovska@lpnu.ua
ORCID: 0000-0003-2774-3931

ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ: ІСТОРІЯ ТА СТАНОВЛЕННЯ

Анотація. Стаття присвячена використанню штучного інтелекту у різних галузях економіки країни. Розглянуто історію виникнення терміну «штучний інтелект» і впровадження його у науковий обіг у дослідженнях, спрямованих на створення інтелектуальних машин. Ініціатором проведення наукового заходу, присвяченого проблемам створення інтелектуальних машин, став Джон Маккарті (доцент математики в Дартмутському коледжі). У 1956 році в м. Дартмут відбувся знаковий семінар, де десятеро науковців у галузі математики та комп'ютерних наук зібралися для обговорення можливості створення електронних обчислювальних машин, здатних навчатися, розв'язувати завдання та демонструвати інші форми інтелекту.

Мета роботи. Проведено аналіз різних видів штучного інтелекту, які використовуються у сучасних галузях економіки: аналітичний, функціональний, інтерактивний, текстовий та візуальний. Для вирішення реальних проблем у різних галузях економіки та суспільного життя і побудови моделі на основі штучного інтелекту використовуються різні технології та алгоритми. Наведено переваги і недоліки використання штучного інтелекту в промисловості.

Методологія. Основною метою використання штучного інтелекту є намагання навчити комп'ютери і машини виконувати когнітивні функції мозку людини – здатність розуміти, пізнавати, вивчати, усвідомлювати, сприймати і переробляти зовнішню інформацію, і наслідком надати їм таких функцій людини, як вирішення проблем, прийняття рішень, сприйняття та розуміння людського спілкування.

Наукова новизна. Проведено аналіз історії виникнення, розвитку та застосування штучного інтелекту на сучасному етапі розвитку світової економіки.

Висновки. Штучний інтелект вже використовується у різних галузях економічного та суспільного життя держави і продовжує надалі активно розвиватися, завойовуючи все більше процесів у сфері застосування: виробничі процеси, сільське господарство, охорона навколишнього середовища, медицина, соціальні відносини, безпека та охорона.

Ключові слова: штучний інтелект, четверта промислова революція, Industry 4.0, Індустрія 4.0, промислові революції, Дартмутський семінар.

Serhiy STASEVYCH, Olena HOLODOVSKA. ARTIFICIAL INTELLIGENCE: HISTORY AND FORMATION

Abstract. The article is devoted to the use of artificial intelligence in various sectors of the country's economy. The history of the emergence of the term «artificial intelligence» and its introduction into scientific circulation in research aimed at creating intelligent machines is considered. The initiator of the scientific event dedicated to the problems of creating intelligent machines was John McCarthy (associate professor of mathematics at Dartmouth College). In 1956, a landmark seminar was held in Dartmouth, where ten scientists in the field of mathematics and computer science gathered to discuss the possibility of creating electronic computing machines capable of learning, solving problems, and demonstrating other forms of intelligence.

The purpose of the work. An analysis of various types of artificial intelligence used in modern sectors of the economy is carried out: analytical, functional, interactive, textual and visual. To solve real problems in various sectors of the economy and social life and build a model based on artificial intelligence, various technologies and algorithms are used. The advantages and disadvantages of using artificial intelligence in industry are presented.

Methodology. The main goal of using artificial intelligence is to try to teach computers and machines to perform the cognitive functions of the human brain – the ability to understand, learn, study, realize, perceive and process external information, and as a result, to provide them with such human functions as problem solving, decision-making, perception and understanding of human communication.

Scientific novelty. An analysis of the history of the emergence, development and application of artificial intelligence at the current stage of development of the world economy is carried out.

Conclusions. Artificial intelligence is already used in various sectors of the economic and social life of the state and continues to actively develop further, conquering more and more processes in the field of application: production processes, agriculture, environmental protection, medicine, social relations, safety and security.

Key words: artificial intelligence, fourth industrial revolution, Industry 4.0, Industry 4.0, industrial revolutions, Dartmouth Seminar.

Постановка проблеми. Штучний інтелект (artificial intelligence, AI) – це набір алгоритмів, щоб навчити комп'ютер чи програмне забезпечення мислити аналогічно людському мозку. Цього можна досягти вивченням роботи людського мозку та аналізу когнітивних процесів людини. Результатом таких досліджень є розробка інтелектуального програмного забезпечення.

Штучний інтелект фактично означає машини, які можуть виконувати завдання, які зазвичай вимагають людського інтелекту, наприклад візуальне сприйняття, розпізнавання мовлення, прийняття рішень і переклад мови, тоді як машинне навчання відноситься до підмножини штучного інтелекту, яка передбачає здатність машин більше навчатися на даних, ніж програмувати їх для виконання конкретних завдань.

Штучний інтелект – це інноваційна галузь, яка займається створенням розумних машин, здатних виконувати завдання, які зазвичай потребують людського інтелекту. Розробки у цій галузі ставлять за мету зробити комп'ютери розумними та інтелектуальними, надавши їм здатність мислити та користуватися комп'ютерними програмами чи машинами, аналогічно як мислить та функціонує людина.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технологія штучного інтелекту є провідною технологією епохи Четвертої промислової революції [4] (англ. The Fourth Industrial Revolution – Industry 4.0), яка здатна моделювати людську поведінку та інтелект у машинах і системах. Моделювання з використанням штучного інтелекту є основою до побудови автоматизованих, інтелектуальних та розумних систем відповідно до потреб сьогодення.

Ключові технологічні революції в історії людства, такі як винайдення парової машини, перехід до електрики, стрімкий розвиток обчислювальної техніки та електроніки, поява Інтернету та Big Data, стали рушійною силою для появи новітніх технологій і започаткували новий етап суспільного розвитку. Ці революційні зміни призвели до підвищення продуктивності праці, зростання добробуту працівників і прискоренню урбанізації, спричинили значні зміни в структурі та організації виробництва.

Прогрес людства зупинити неможливо. Виробництво, енергія та інформація – ось ключові галузі, що кардинально змінюють людство, вже вчетверте. Революція – це процес, який забезпечує зміну принципів виробництва за рахунок появи нових джерел енергії та інформаційного стрибка. Усе це тягне за собою зміни в культурі та способі життя людей.

Перша промислова революція (індустріальна, друга половина XVIII ст. – перша половина XIX ст.) [7] характеризувалася створенням парової машини та виробництвом чавуну, і переходом від ручного, ремісничо-мануфактурного й доморобного до великого машинного фабрично-заводського виробництва. Наслідком першої промислової революції стала мережа залізниць, яка вкрила кожен розвинуту країну. Розповсюдження друкарського верстату назавжди змінило інформаційне поле у засобах масової інформації та сфері освіти.

Друга промислова революція (технологічна, революція в транспорті та зв'язку, друга половина XIX ст. початок XX ст.) [7], яка включала низку розробок у хімічній, електротехнічній, нафтовій та сталеливарній промисловості, запровадження електрифікації як нового джерела енергії, впровадження конвеєрного виробництва, поширення залізниць, телеграфу та трансокеанського пароплавства зі сталевими корпусами кораблів.

У другій промисловій революції закріплюється використання нових джерел сировини та енергії, особливо електроенергії, і все більше використовується нафта. У перші десятиліття двадцятого століття революція у зв'язку та на транспорті посилилася з поширенням автомобільної та аеронавігаційної промисловості, а також телефонії та радіопередач [7].

У той час як перша революція була заснована на залізі та паровій енергії з вугілля, то друга – була заснована на електриці та сталі, забезпечуючи відповідні розробки в галузі зв'язку, хімії та використання нафти.

Конвеєр зробив виробництво масовим, електрика та нафта стали новим етапом у виробництві та споживанні енергії, а телеграф, радіо та телебачення змінили швидкість розповсюдження інформації. Почало розвиватися *суспільство споживання*, яке стало споживачем виробленого масового продукту, як матеріального, так і інформаційного.

Третя промислова революція (інформаційна, почалася в 1970-х роках) [1] характеризується автоматизацією виробництва за допомогою комп'ютерної техніки та впровадженням інформаційно-комунікаційних технологій, повсюдним переходом від аналогових технологій до цифрових у всіх галузях економіки.

Що ж приходить на цьому етапі на зміну в галузях суспільного життя? Розглянемо всі три складові революції – виробництво, енергія та інформація.

Виробництво. Виробництво товарів споживання все більше йде до спрощення та автоматизації (почасти і роботизації) процесу. Перенасичення ринку масовими товарами споживання спонукає людей

до пошуку і виготовлення унікального та персоналізованого продукту. Відбувається різкий поворот розвинутих країн до пропагування і розвитку *суспільства споживання*.

Енергія. Викопне традиційне паливо (нафта та газ) поступається місцем відновлювальній енергії. Розвиток альтернативної енергетики за останні 20 років вражає. Джеремі Ріфкін (Jeremy Rifkin, американський економіст, соціолог і публіцист), який вивчає енергетичний аспект постіндустріального світу, ще у 2011 році виділив п'ять основних ознак третьої промислової революції в енергетичній сфері [8]: а) відновлювальна енергетика; б) споруди, які самостійно генерують енергію у місці її споживання; в) водневі (Hydrogenium) технології та технології для зберігання енергії; г) smart grid (так званий "інтелектуальний енергетичний інтернет" (надлишок згенерованої енергії віддається в енергомережу); д) використання електромобілів із заряджанням з енергомережі.

Інформація. Ця складова характеризується єдиним словом: Інтернет. Більшість людей до цього була в першу чергу споживачем інформації, але всесвітня мережа створила умови, коли кожен може спробувати себе у ролі творця і розповсюджувача довільного контенту за принципом "будь-де, будь-коли і завжди".

Четверта промислова революція (цифрова, почалася із середини минулого століття) спирається на третю, триває цифровізації в усіх сферах життя. Клаус Шваб (Klaus Schwab, швейцарський економіст, засновник і президент Всесвітнього економічного форуму в Давосі) у 2015 році написав [11]: «Технології зливаються, і кордони матеріального, цифрового і біологічного світів стираються».

Четверта промислова революція [4] – поняття, що означає розвиток і злиття автоматизованого виробництва, обміну даних і виробничих технологій в єдину саморегульовану систему, з як найменшим або взагалі відсутнім втручанням людини у виробничий процес.

Вперше термін «Industry 4.0» [5] був представлений у квітні 2011 року на Ганноверському ярмарку трьома представниками бізнесу, політики та науки Henning Kagermann, Wolf-Dieter Lukas, Wolfgang Wahlster, які виступили з ініціативою підвищення конкурентоздатності німецької економіки.

Клаус Шваб визначив термін «Industry 4.0» [11] як «збірне поняття для технологій і концепцій організації ланцюжка створення додаткової вартості» із використанням кіберфізичних систем, Інтернету речей, Інтернету послуг, Розумних заводів [2].

Постановка завдання. Метою статті є історія виникнення і становлення технологій штучного інтелекту, аналіз моделей ШІ, які використовуються у різних сферах економічного та суспільного життя держави.

Виклад основного матеріалу. Четверта промислова революція передбачає швидкі зміни в технологіях, галузях, соціальних моделях і процесах, інтеграцію новітніх технологій у виробництво, розмиття меж між різними сферами людської діяльності.

За десятиліття, що минуло від проголошення початку епохи «Industry 4.0», можна коротко визначити основні технології четвертої промислової революції [3]:

- *Штучний інтелект*, як одна з ключових технологій в радикальній трансформації економіки, суспільства і ринку праці.

- *Технологія Інтернету речей* встановила міцний зв'язок між фізичним та цифровим світом, зробила революцію в багатьох галузях суспільного життя.

- *Автоматична ідентифікація та захоплення даних (AI3Д)* відноситься до методів автоматичної ідентифікації об'єктів, збору даних про них та введення їх безпосередньо в комп'ютерні системи без участі людини. Технології AI3Д включають QR-коди, штрих-коди, радіочастотна ідентифікація (RFID, radio frequency identification), біометричні дані (наприклад, райдужна оболонка та система розпізнавання обличчя), магнітні смуги, оптичне розпізнавання символів (OCR), смарт-карти та розпізнавання голосу. AI3Д також називають «автоматичною ідентифікацією» та «автоматичним захопленням даних».

- *Колаборативні роботи (кобот)* – роботи, спеціально розроблені для фізичної взаємодії з людьми для спільної роботи у створенні або виробництві різних продуктів.

- *Доповнена й віртуальна реальність* – технології, які об'єднують реальний світ з цифровим, створюють реалістичні зображення, звуки та інші образи, здатні перенести користувача прямо в центр захопливого вигаданого світу.

- *Великі дані* – технології Індустрії 4.0 дозволяють перетворювати дані в інформацію. Великі дані дозволяють управляти потужним потоком інформації і інтерпретувати це в цілях бізнесу.

- *3D і 4D друк* – ця технологія набуває все більшого значення в дизайні, архітектурі, інженерії та інших сферах. 3D-друк робить виробництво доступним для більшої кількості людей, ніж будь-коли раніше. Це, в першу чергу, пов'язано з відносно малою ціною 3D-принтера, невеликими розмірами принтерів у порівнянні з традиційним виробництвом. Розробка прототипів товару або продуктів для продажу відбувається швидко, точно і економічно за допомогою використання 3D- і 4D-друку.

Штучний інтелект є базовим елементом Четвертої промислової революції і ключовим рушієм впровадження інновацій у різних галузях економіки та суспільного життя, запровадження трансформаційних змін у світовій економіці, радикально впливаючи на структуру ринку, форми зайнятості, продуктивність та конкурентоспроможність. Штучний інтелект трансформує сучасний світ через автоматизацію, оптимізацію процесів і впровадження нових технологічних рішень.

Здатність штучного інтелекту до самонавчання, аналізу великих обсягів даних і автономного прийняття рішень дозволяє істотно підвищувати ефективність у різних сферах економічної діяльності.

Історія виникнення терміну «штучний інтелект»

У серпні 1955 року Джон Маккарті (John McCarthy) (на той час доцент математики в Дартмутському коледжі) використав термін «штучний інтелект» у своїй заявці на отримання гранту для проведення літнього дослідницького проекту в Дартмуті (Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence) [6]. Цей проект мав на меті зібрати провідних науковців для обговорення можливостей створення машин, здатних мислити та вирішувати складні завдання, як це роблять люди.

У заявці на грант сказано: «Ми пропонуємо провести двомісячне дослідження штучного інтелекту за участю 10 осіб протягом літа 1956 року в Дартмутському коледжі в Ганновері, Нью-Гемпшир. Дослідження має продовжуватися на основі гіпотези про те, що кожен аспект навчання або будь-яка інша особливість інтелекту в принципі може бути описана настільки точно, що може бути створена машина для його моделювання. Буде зроблено спробу знайти, як змусити машини використовувати мову, формувати абстракції та поняття, вирішувати проблеми, які зараз резервовані для людей, і самовдосконалюватися. Ми вважаємо, що можна досягти значного прогресу в одній чи кількох із цих проблем, якщо ретельно відібрана група вчених попрацює над нею разом протягом літа» [6].

Цю заявку на проведення семінару профінансував Фонд Рокфеллера (The Rockefeller Foundation). Саме на цьому семінарі в 1956 році термін «штучний інтелект» був офіційно введений в науковий обіг та став загальноприйнятим для позначення напряму досліджень, спрямованих на створення інтелектуальних машин.

Джон Маккарті запропонував використовувати термін «штучний інтелект», щоб відмежувати цю галузь досліджень від вже відомої кібернетики. Він хотів підкреслити, що ШІ має справу не просто з автоматизацією, а зі створенням машин, які здатні мислити та вирішувати завдання, що потребують інтелекту.

На Дартмутському семінарі Маккарті та його колеги обговорили шляхи створення машин, здатних до навчання, розв'язання задач та інших видів інтелектуальної діяльності. Хоча на той час ШІ знаходився на ранній стадії розвитку, саме цей семінар заклав фундамент для подальших досліджень у цій галузі.

На семінарі були визначені деякі аспекти використання штучного інтелекту.

1. *Автоматичні ЕОМ – Automatic Computers.* Швидкості та об'єму пам'яті сучасних комп'ютерів може бути недостатньо для імітації багатьох вищих функцій людського мозку, але головною перешкодою є не брак машинних можливостей, а наша нездатність писати програми, використовуючи всі можливості, які ми маємо.

2. *Як можна запрограмувати комп'ютер на використання мови – How Can a Computer be Programmed to Use a Language.* Значна частина людської думки складається з маніпулювання словами відповідно до правил міркування та правил припущень. З цієї точки зору формування узагальнення складається з прийняття нового слова та деяких правил, згідно з якими речення, що його містять, означають і мають на увазі інші.

3. *Нейронні мережі – Neuron Nets.* Як набір гіпотетичних нейронів можна організувати так, щоб формувати поняття.

4. *Теорія визначення тривалості розрахунку – Theory of the Size of a Calculation.* Потрібен якийсь критерій визначення ефективності розрахунку. Для визначення ефективності обчислень необхідно мати під рукою метод вимірювання складності обчислювальних пристроїв.

5. *Самовдосконалення – Self-improvement.* Справді розумна машина виконуватиме діяльність, яку найкраще можна описати як самовдосконалення.

6. *Абстракції – Abstractions.* Потрібно класифікувати абстракції і описати машинні методи формування абстракцій із сенсорних та інших даних.

7. *Випадковість і творчість – Randomness and Creativity.* Різниця між творчим мисленням і уявним компетентним мисленням полягає в додаванні певної випадковості. Щоб бути ефективною, випадковість повинна керуватися інтуїцією. Іншими словами, обґрунтована здогадка чи передчуття включають контрольовану випадковість у впорядковане мислене.

У семінарі взяли участь 10 вчених, які працювали в галузі математики та обчислювальної техніки: Джон Маккарті (John McCarthy, Dartmouth College); Марвін Мінські (Marvin Minsky, Harvard University); Клод Шеннон (Claude Shannon, Bell Telephone Laboratories); Натаніель Рочестер (N. Rochester, I.B.M. Corporation); Артур Самюель (Arthur Samuel, I.B.M. Corporation); Аллен Ньюелл (Allen Newell, Carnegie Institute of Technology); Герберт Саймон (Herbert A. Simon, Carnegie Institute of Technology); Тренчард Мур (Trenchard More, Princeton University); Рей Соломонов (Raymond J. Solomonoff, Massachusetts Institute of Technology); Олівер Селфрідж (Oliver G. Selfridge, Massachusetts Institute of Technology).

Сфера використання штучного інтелекту у різних галузях величезна. Розглянемо потенційні методи вирішення реальних проблем, де результати використовуються для створення автоматизованих, інтелектуальних і розумних систем у різних галузях економіки та сферах суспільного життя.

Для побудови моделі на основі штучного інтелекту використовуються різні ключові технології та методи ШІ [10]: машинне навчання; нейронні мережі та глибоке навчання; видобування даних, виявлення знань та розширена аналітика; моделювання на основі правил та прийняття рішень; підхід на основі нечіткої логіки; представлення знань, міркування про невизначеність та моделювання експертних систем; міркування на основі прецедентів; видобування тексту та обробка природної мови; візуальна аналітика, комп'ютерний зір та розпізнавання образів; гібридизація, пошук та оптимізація.

Ці методи відіграють важливу роль у розробці інтелектуальних і розумних систем у різних галузях економіки та суспільного життя, такі як бізнес, промисловість, фінанси, охорона здоров'я, сільське господарство, розумні міста, кібербезпека та багато інших.

Епоха четвертої промислової революції представляє нову еру інновацій у технологіях, керованих штучним інтелектом для збирання даних з наступною їх інтерпретацією. Глобальна мережа Інтернет та мобільний Інтернет у мережі 4G започаткували третю промислову революцію. То тепер технології штучного інтелекту використовуються в Industry 4.0 для автоматизації промислових технологій та обміну даними в режимі реального часу, яка включає кіберфізичні системи, Інтернет речей, хмарні обчислення та когнітивні обчислення, розвиток розумної фабрики.

Для вирішення різних реальних проблем можуть застосовуватися різні типи штучного інтелекту: *аналітичний, функціональний, інтерактивний, текстовий і візуальний ШІ*.

Розробка ефективної моделі штучного інтелекту є складною задачею через її динамічний характер і варіації проблем і даних реального світу. Тому розглянемо основні характеристики різних типів штучного інтелекту [9]:

Аналітичний ШІ займається процесом ідентифікації, інтерпретації та передачі значущих закономірностей даних. Він спрямований виявлення нових ідей, закономірностей і взаємозв'язків або залежностей у даних та допомогу в прийнятті рішень на основі даних. Отже, у сфері сучасного бізнес-аналізу він стає ключовою частиною ШІ, яка може надавати інформацію підприємству та генерувати пропозиції або рекомендації завдяки своїм можливостям аналітичної обробки.

Функціональний ШІ працює подібно до аналітичного ШІ, оскільки він також досліджує величезні обсяги даних для виявлення закономірностей та залежностей. Однак, функціональний ШІ виконує дії, але не надає рекомендації до дій.

Інтерактивний ШІ забезпечує ефективну та інтерактивну автоматизацію комунікації в багатьох аспектах нашого повсякденного життя, особливо в комерційній сфері, наприклад, для створення чат-ботів та розумних персональних помічників.

Текстовий ШІ охоплює текстову аналітику або обробку природної мови, завдяки чому споживачі можуть користуватися можливостями розпізнавання тексту, перетворення мовлення на текст, машинного перекладу, а також можливостями генерації контенту.

Візуальний ШІ здатний розпізнавати, класифікувати та сортувати елементи, а також перетворювати зображення та відео на інформацію. Цей вид штучного інтелекту часто використовується в таких сферах, як комп'ютерний зір і доповнена реальність.

Виходячи із характеристик технологій штучного інтелекту можна виділити три важливі аспекти до застосування ШІ: автоматизація, інтелектуальні обчислення, розумні обчислення.

Автоматизація охоплює широкий спектр технологій, що зменшують взаємодію людини в операціях. Автоматизацію можна охарактеризувати як розробку та впровадження технологій для виробництва та доставки продуктів і послуг з метою підвищення ефективності, надійності та швидкості виконання різних робіт. Технологія штучного інтелекту має потенціал для автоматизації практично будь-якої галузі та кожної людини на планеті.

Інтелектуальні обчислення – це обробка інформації, інтелектуальний аналіз даних і виявлення знань, машинне навчання, розпізнавання образів, обробку сигналів, обробку природної мови, нечіткі системи, представлення знань і міркування. Інтелектуальні обчислення – це здатності комп'ютера або

інформаційної системи отримувати ідеї або корисні знання з даних або експериментальних спостережень, або вивчати конкретне завдання.

Розумні обчислення використовуються як технологія самоконтролю, аналізу та звітності в розумних обчисленнях. Технологію розумних обчислень можна розглядати як наступне покоління комп'ютерів, яке використовується для створення чогось самосвідомого, тобто щось, що може відчувати діяльність свого оточення, обробляти зібрані дані, виконувати певну аналітику та надавати найкращі рішення, а також прогнозувати майбутні ризики та виклики.

Переваги використання ШІ в промисловості

Підвищення ефективності та продуктивності: автоматизація процесів та оптимізація виробництва дозволяють підприємствам підвищувати ефективність та продуктивність своєї роботи.

Зниження витрат: оптимізація виробництва, логістики та енергоспоживання дозволяє підприємствам знижувати свої витрати.

Підвищення якості продукції: автоматичний контроль якості та виявлення дефектів на ранніх стадіях виробництва дозволяють підприємствам підвищувати якість своєї продукції.

Покращення безпеки праці: виявлення небезпечних ситуацій та автоматичне блокування обладнання дозволяють підприємствам покращувати безпеку праці на виробництві.

Недоліки використання ШІ в промисловості

Висока вартість впровадження: впровадження ШІ в промисловості може потребувати значних інвестицій у обладнання, програмне забезпечення та навчання персоналу.

Необхідність кваліфікованих кадрів: для роботи з ШІ-системами потрібні кваліфіковані кадри, які мають знання та навички в галузі штучного інтелекту.

Етичні питання: використання ШІ в промисловості може викликати етичні питання, такі як скорочення робочих місць та відповідальність за рішення, прийняті ШІ-системами.

Незважаючи на існуючі виклики, штучний інтелект вже сьогодні відіграє важливу роль у промисловості, допомагаючи підприємствам ставати більш ефективними, конкурентоспроможними та безпечними. З розвитком технологій, роль ШІ в промисловості буде тільки зростати.

Висновки. Штучний інтелект вже проник у багато сфер нашого життя і продовжує активно розвиватися, знаходячи застосування у найрізноманітніших галузях економіки держави. Ось деякі з них.

Автоматизація виробничих процесів для підвищення їх ефективності та зниження витрат, контроль якості продукції на ранніх стадіях виробництва, прогнозування поломок обладнання для його своєчасного обслуговування, управління маршрутами доставки комплектуючих та товарів, прогнозуючи попит та оптимізуючи їх доставку.

У сільському господарстві для оптимізації поливу, внесення добрив та захисту рослин від шкідників, автоматизації збирання врожаю, прогнозування врожайності сільськогосподарських культур. В енергетиці для оптимізації енергоспоживання споживачами, виробництва енергії з відновлюваних джерел та управління енергетичними мережами.

Охорона навколишнього середовища – моніторинг стану навколишнього середовища (повітря, води та ґрунту), прогнозування стихійних лих, розробка нових екологічно чистих технологій. Допомагає вченим аналізувати великі обсяги даних та виявляти закономірності, які можуть бути непомітними для людини, моделювання складних процесів, таких як зміна клімату або розвиток епідемій, відкриття нових матеріалів з унікальними властивостями. Безпілотні транспортні засоби, оптимізація роботи світлофорів для зменшення заторів, виявлення небезпечного водіння та запобігання дорожньо-транспортним пригодам.

Діагностика захворювань у медицині, аналіз медичних зображення та даних пацієнтів, розробка нових лікарських засобів, в хірургічних діях для підвищення точності та мінімізації інвазивності операцій.

Безпека та охорона – розпізнавання обличчя у системах відеоспостереження та контролю доступу, виявлення загроз безпеці в аеропортах, на вокзалах та інших громадських місцях, захист комп'ютерних системи від кібератак, боротьба з фейками та дезінформацією в інтернеті.

Список використаних джерел:

1. Duarte A.Y.S, Sanches R. A., Dedini F. G. Assessment and technological forecasting in the textile industry: From first industrial revolution to the industry 4.0. *Strategic Design Research Journal*. 2018. 11(3), 193–202.
2. Hermann M., Pentek T., Otto B. *Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review*. 2015. URL: https://web.archive.org/web/20160207204432/http://www.snom.mb.tu-dortmund.de/cms/de/forschung/Arbeitsberichte/Design-Principles-for-Industrie-4_0-Scenarios.pdf (дата звернення: 17.04.2025).
3. Idcard. *Why is the Fourth Industrial Revolution so important? Understanding Industry 4.0 technologies*. 2021. URL: <https://idcard.com.ua/ua/blog/why-is-the-fourth-industrial-revolution-so-important/> (дата звернення: 17.04.2025).

4. Kagermann H., Lukas W.-D., Wahlster W. *Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution*. 2011. URL: <http://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Gesellschaft/Industrie-40-Mit-Internet-Dinge-Weg-4-industriellen-Revolution> (дата звернення: 17.04.2025).
5. Maynard A. D. Navigating the fourth industrial revolution. *Nature Nanotechnology*. 2015. 10(12), 1005–1006.
6. McCarthy J. *A proposal for the dartmouth summer research project on artificial intelligence*. University of Leeds. 1996. URL: <https://www-formal.stanford.edu/jmc/history/dartmouth/dartmouth.html> (дата звернення: 17.04.2025).
7. Ortiz J. H. (Ed.). *Industry 4.0 – Current Status and Future Trends*. IntechOpen. 2020. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.86000>.
8. Rifkin J. *The Third Industrial Revolution: How Lateral Power Is Transforming Energy, the Economy, and the World*. Palgrave Macmillan, London. 2011. 5–15.
9. Russell S., Norvig P. *Artificial intelligence: A modern approach* (4th ed., Global ed.). Foundations. 2021. 19(23).
10. Sarker I. H. AI-Based Modeling: Techniques, Applications and Research Issues Towards Automation, Intelligent and Smart Systems. *SN Computer Science*. 2022. 3(158). DOI: <https://doi.org/10.1007/s42979-022-01043-x> (дата звернення: 17.04.2025).
11. Schwab K. *The Fourth Industrial Revolution. What It Means and How to Respond*. 2015. URL: <https://www.foreignaffairs.com/world/fourth-industrial-revolution> (дата звернення: 17.04.2025).

UDC 519.1:519.7:007.5

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.32>**Andrii STOPKIN**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Mathematics and Informatics,
State Higher Educational Institution «Donbas State Pedagogical University», stepkin.andrej@gmail.com
ORCID: 0000-0002-6130-9920

THE USE OF A COLLECTIVE OF MOBILE AGENTS FOR THE EXPLORATION OF UNDIRECTED GRAPHS

Abstract. The study proposed in this work is devoted to the problem of graph exploration by a collective of agents consisting of one stationary agent, which performs the necessary computations, and two mobile agents, which move through the graph and collect information about its structure.

The purpose of this work is to develop a new efficient algorithm for the exploration of finite undirected graphs without loops and multiple edges by a collective of agents. The paper proposes the following **methodology** to achieve this goal: utilizing a collective of three agents. Two of them are agent-researchers, which can move through the graph, read labels on graph elements, and place or remove these labels. The agent-researchers have finite memory that does not depend on the number of nodes in the explored graph and use two colors each (three distinct colors in total) for graph exploration. During the process, the agent-researchers send messages to the third agent, the agent-experimenter, which is a stationary agent that stores the results of the agent-researchers' operations. Based on this information, the agent-experimenter gradually constructs a representation of the explored graph in its memory in the form of edge and node lists. The paper describes the working modes of the agent-researchers in detail. It also thoroughly examines the algorithm for processing the messages received by the agent-experimenter from the agent-researchers, which serves as the basis for constructing a map of the explored graph. The study analyzes the time, space, and communication complexities of the developed algorithm and evaluates the number of edge transitions required for agents to explore the graph.

The scientific novelty lies in the development of an efficient algorithm for graph exploration by a collective of agents.

Conclusions. The paper proposes a new graph exploration algorithm that has quadratic time, space, and communication complexities, with the number of edge transitions performed by the agent-researchers being estimated as $O(n^2)$, where n is the number of nodes in the explored graph. The functioning of the proposed exploration algorithm is based on the depth-first traversal method.

Key words: graph exploration, undirected graphs, algorithm complexity, depth-first traversal method, collective of agents.

Андрій СТОПКІН. ВИКОРИСТАННЯ КОЛЕКТИВУ МОБІЛЬНИХ АГЕНТІВ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ НЕОРІЄНТОВАНИХ ГРАФІВ

Анотація. Дослідження, запропоноване в роботі присвячено вивченню проблеми розпізнавання графів колективом агентів, що складається з одного нерухомого агента, що виконує необхідні обчислення та двох мобільних агентів, що рухаються графом та збирають інформацію про його структуру.

Метою роботи є побудова нового ефективного алгоритму розпізнавання скінчених неорієнтованих графів без петель та кратних ребер колективом агентів. В статті запропоновано наступну **методологію** до досягнення поставленої мети: використати колектив агентів, що складається з трьох агентів. Два агенти є агентами-дослідниками, які можуть переміщуватися по графу, зчитувати мітки на елементах графу й залишати або видаляти ці мітки. Агенти-дослідники мають скінчену пам'ять, яка не залежить від кількості вершин досліджуваного графа та для розпізнавання графу використовують по дві фарби кожен (всього три фарби різного кольору). Під час роботи агенти-дослідники відправляють повідомлення третьому агенту – агенту-експериментатору, який представляє собою нерухомого агента, в пам'яті якого фіксується результат функціонування агентів-дослідників. На основі цієї інформації він поступово вибудовує в своїй пам'яті представлення досліджуваного графа списками ребер і вершин. У статті наведено режими роботи агентів-дослідників з їх детальним описом. Також детально розглянуто алгоритм обробки агентом-експериментатором повідомлень, отриманих від агентів-дослідників в процесі роботи, на підставі яких відбувається побудова мапи досліджуваного графа. В роботі проаналізовано часову, ємнісну, комунікаційну складності побудованого алгоритму та проведено аналіз кількості переходів по ребрах, які необхідно здійснити агентам для розпізнавання графа.

Науковою новизною є отримання ефективного алгоритму розпізнавання графів колективом агентів.

Висновки. В роботі запропоновано новий алгоритм розпізнавання графів, який має квадратичні часову, ємнісну та комунікаційну складності та кількість переходів по ребрах, які виконують агенти-дослідники, що оцінюється як $O(n^2)$ де n – кількість вершин досліджуваного графа. Робота запропонованого алгоритму розпізнавання ґрунтується на методі обходу графа в глибину.

Ключові слова: розпізнавання графів, неорієнтований граф, складність алгоритму, обхід в глибину, колектив агентів.

Problem statement in general and its connection with the important scientific or practical tasks.

Rapidly developing and increasingly relevant, robotics has become a major field within cybernetics. At the origins of robotics lies the desire to assist humans in performing heavy and even hazardous tasks or, in some cases, to replace humans entirely in such work. Given that many environments remain unexplored

[5] due to their inaccessibility or danger to humans, it becomes evident that the problem of environment exploration by robots is highly relevant [7, 14, 15]. Moreover, using multiple robots instead of a single one [6, 8, 9, 11] increases the likelihood of successfully completing the task, especially considering the potential failure of agents during operation. Additionally, it may even improve the time complexity of the exploration algorithm.

Many works have been dedicated to the exploration of graphs by a single agent, and numerous results have been obtained regarding the feasibility and complexity of such exploration. However, the exploration of a graph by a team of agents wandering through it remains underexplored. This makes the tasks of systematically studying experiments on graph exploration by multiple wandering agents highly relevant. Specifically, these tasks include creating movement routes for agents through an unknown graph, marking its elements, collecting and processing local information about the graph, and constructing the graph based on this information, down to the markings on the graph's elements. Additionally, tasks focused on finding methods to optimize resource usage, time costs, communication channel load, etc., during graph exploration remain important.

In the existing works, little attention has been paid to the study of information exchange between agents, as well as its complexity and potential impact on time and space complexity.

The goal of this work is to create an efficient method and develop a corresponding algorithm for exploring unknown graphs using a collective of agents [12, 13], as well as to investigate the time, space, and communication complexities of the constructed algorithm.

The analysis of recent research and publications, which have initiated the solution of the relevant problems. The beginning of research in this scientific direction is commonly attributed to the work of C. Shannon [10], in which the problem of an automaton-mouse searching for a given target in a maze was considered.

Active studies of automata behavior in mazes began in 1971 after the publication of C. Dopp's work [2], which described the traversal of chessboard mazes by finite automata. Over time, the problem conditions expanded, requiring the automaton to visit all nodes and/or edges of the explored graph (maze).

Later, in [3], research was conducted on analyzing the properties of an unknown environment under various methods of interaction between the automaton and its operating environment, as well as under different levels of prior information about it.

Analysis of a graph includes a number of specific tasks. Let's consider the main ones: the problem of self-localization (determining the node of the graph where the agent is initially located), the problem of map control (checking the isomorphism between the explored graph and the reference graph (map)), and the problem of complete graph exploration (constructing the reference graph (map) of the explored graph). Several approaches have been defined for solving the latter problem, and a number of algorithms for agent wandering through the graph and methods for marking graph elements with colors or stones have been proposed, allowing the exploration of the graph with precision up to isomorphism. Thus, in the work [4], a method is proposed in which the agent, during its movement, marks only the incidentors (the point of connection of edges with nodes) of the edges it has passed. To explore the edges, the agent moves along them and then returns to the initial node via the shortest path. At the same time, it remembers the marks of the passed incidentors, which unambiguously determine the node the agent reached when moving along the explored edge.

In the work [1], agents exchange information about their completed tasks with the base station via a special network. This network has some limitations on data exchange. In other words, to coordinate the actions between agents, it is necessary to first form a network that meets these conditions. Data exchange with the base station occurs in pre-designated locations. The article's feature is asynchronous strategies that work with arbitrary communication models. Asynchrony refers to the possibility of issuing instructions to subgroups of agents at the moment when they are ready to accept them.

In the article [6], an attempt was made to develop general concepts and requirements for graph exploration by multi-agent systems. The proposed representation for the multi-agent system is aimed at providing general conditions for declaring the completion of graph exploration and completing such exploration within a finite time. The work proposes modifications to the incidence matrix for organized information exchange between agents. It also presents a general algorithm for the collective work of agents exploring the graph. The algorithm is based on the proposed generalized structure and the modified incidence matrix.

In the article [9], the author considers the problem of preserving the direction of movement by a collective of finite automata on a two-dimensional integer lattice of width two, where the elements (vertices) are anonymous. The automata do not distinguish between equally labeled vertices by their direction coordinates (i.e., each automaton lacks a compass). The study considers collectives consisting of a single automaton and several pebbles, where the layout of the pebbles is entirely determined by the automaton. It is proven that a collective of an automaton and at most three pebbles cannot maintain the direction of movement on the lattice, but a collective of an automaton and four pebbles can.

The presentation of the main material. The paper considers simple, connected undirected finite graphs $G=(V,E)$ where V is the set of nodes, E is the set of edges (two-element subsets (u,v) , where $u,v \in V$). The three $((u,v),v)$ we call the incidentor (a contact point) of the edge (u,v) and the node v . Through I we denote a set of all the incidentors of the graph. A set $L=V \cup E \cup I$ is called a set of graph G elements. A surjective map $\mu: L \rightarrow \{w, r, y, ry, b\}$, where w is interpreted as white, r is red, y is yellow, ry is red-yellow and b is black, we call the coloring function of the graph G . A pair (G, μ) is called a colored graph. A sequence $u_1, u_2, \dots, u_k$ of pairwise adjacent nodes of the graph G is called a length path of k . The vicinity $Q(v)$ of the node v we call the set of elements of the graph, consisting of a node v , all nodes u adjacent to v , all edges (v,u) and all the incidentors $((v,u),v), ((v,u),u)$. The cardinality of the sets of nodes V and edges E we denote through n and m , respectively. It is clear that $m \leq \frac{n(n-1)}{2}$. We call the isomorphism of the graph G and the graph H such a bijection $\varphi: V_G \rightarrow V_H$ that $(v,u) \in E_G$ exactly when $(\varphi(v), \varphi(u)) \in E_H$. Thus, isomorphic graphs are equal up to the designation of nodes and the coloring of their elements.

A collective of agents consists of two types of agents:

Agent-Researcher (AR) – an agent that can move along a finite graph, during the process of its work, it can color the nodes, edges, and incidentors of the graph, perceive these marks (based on these marks, the AR moves along the graph), and also send messages to the Agent-Experimenter (AE);

Agent-Experimenter (AE) – a stationary agent that, during its work, can send, receive, and identify messages from AR, possesses a finite, unbounded growing internal memory, where the results of AR's functioning at each step are recorded, and in addition, a representation of the graph (initially unknown to the agents) is gradually built from lists of edges and nodes.

The paper proposes an algorithm that uses two ARs (let's call them agents A and B) and one AE. For the work of each AR, two colors are required: for agent A it is r , for agent B it is b , so in total, the algorithm uses three colors: r, y, b .

At the beginning of the work, AR A and AR B are placed in arbitrary non-coincident nodes of the graph G . The agents go «in depth» as far as possible, return, search for another path with unvisited nodes and untraversed edges. If an adjacent node is discovered, colored in a «foreign» color, the agent marks all the isthmuses (edges connecting subgraphs explored by different ARs) from the current node to the foreign area and informs the second AR, through the AE, about the need to explore the marked isthmuses. While the second AR is exploring the isthmuses, the first AR cannot mark new isthmuses. If there are no other possible movement options except for marking a new isthmus, the first AR stops until the second AR has explored all the marked isthmuses. When moving to white nodes in the graph, ARs A and B color its elements in red and yellow, respectively. When moving «in depth», the red (yellow) path is extended, and when moving back, it shortens. When moving back, the length of the path does not change for exploring back edges or isthmuses. A node, from which only backward movement along its path is possible, or where no movement options exist, is colored black. Thus, the red and yellow paths of each agent are formed. The algorithm ends when the red and yellow paths become empty, and all nodes are black. During the graph traversal, the agents create an implicit numbering of visited nodes. Upon first visiting a node, the agent A colors it red (agent B – yellow), and the AE assigns it a number equal to the value of the variable Ct_A (Ct_B for agent B). Note that the variables are stored and processed by the AE and can only take odd and even values, respectively. The graph reconstruction is carried out based on the numbering created by the agents by constructing a graph isomorphic to G .

Now let's consider the modes in which the ARs can operate. The messages sent by the ARs in the corresponding situation are indicated in parentheses, specifying the name of the agent sending the message («MESSAGE_A»; «MESSAGE_B»).

1. *Normal operating mode.* In this mode, the AR moves along nodes colored white, painting these nodes, their connecting edges, and distant incidentors in its designated color (red for agent A , yellow for agent B) («FORWARD_A»; «FORWARD_B»). If there are no white nodes or other possible movement paths, the AR retraces its path, coloring the visited nodes, their connecting edges, and nearby incidentors black («BACK_A»; «BACK_B»). The AR stops working when its starting node is colored black due to the absence of possible movement paths («STOP_A», «STOP_B»).

2. *Back edge exploration mode.* If, while moving forward, the AR detects a white edge in node v whose distant node is colored in its «own» color (a back edge), it switches to back edge exploration mode and colors the near incidentors of all back edges incident to node v in its «own» color («MARK_BE_A»; «MARK_BE_B»). After completing the coloring of the incidentors, the AR moves back along its path, sending a message at each step («RETREAT_A»; «RETREAT_B»), until it reaches the node incident to the previously marked back edge. It then traverses this edge, coloring it black («FORWARD_BE_A»; «FORWARD_BE_B»). If there are still unexplored back edges, the AR moves back along the previously traversed edge, coloring the near incidentor black, and

continues searching for back edges. After detecting the last back edge, the AR colors its near incidentor black («BE_EXPLORED_A»; «BE_EXPLORED_B») and completes its work in back edge exploration mode.

3. *Isthmus Marking Mode.* If, during the graph exploration, an isthmus is detected in node v , the AR switches to isthmus marking mode, provided that all previously marked isthmuses by this AR have been explored by the second AR. If the second AR has not yet explored all the marked isthmuses, the first AR cannot mark new ones. If the first AR has no other possible moves except marking a new isthmus, it stops until the second AR explores all previously marked isthmuses. In this mode, the AR colors the near incidentors of all isthmuses incident to node v in black («MARK_AB»; «MARK_BA»). When all isthmuses are marked, the AR completes its work in this mode («FIX_A»; «FIX_B»). Upon completion of the isthmus marking mode, the agent stores information about the number of marked isthmuses. In this mode, agent A has priority over agent B . Therefore, if both ARs detect the same isthmus simultaneously, it will be marked by agent A .

4. *Mode of Isthmus Exploration.* Upon receiving a command from the AE to explore isthmuses, the AR switches to the isthmus exploration mode. If, at that moment, the AR is operating in the back edge exploration mode, it will not switch to the isthmus exploration mode until the current mode is completed. Upon switching, the AR checks whether there are any possible movement paths from its current node other than moving backward along its path. If such paths exist, the AR moves back along its path without coloring anything («RETREAT_A»; «RETREAT_B») until it detects the nearest node incident to a white edge whose distant incidentor is colored black and whose distant node is colored in the «foreign» color (isthmus edge). If no such paths exist, the AR continues moving back along its path, coloring it black («BACK_A»; «BACK_B») until it reaches a node incident to a marked isthmus or a node with other possible movement paths. In the latter case, the AR continues moving back along its path without coloring anything (sending a message «RETREAT_A»; «RETREAT_B» at each step) until it detects the nearest node incident to a marked isthmus.

If during the marking of isthmuses one isthmus has been marked, the AR colors the nearest incidentor of the marked isthmus in black («EXPLORED_AB»; «EXPLORED_BA») and then moves forward to the end of its path, marked in «own» color.

If, however, at least two isthmuses have been marked, the AR colors the nearest incidentor of the marked isthmus in «own» color («EXPLORED_AB»; «EXPLORED_BA»). The AR then moves backward along its path («RETREAT_A»; «RETREAT_B») until the next marked isthmus is found. In this case, if the marked isthmus is not the last one, the AR colors the nearest incidentor in black («EXPLORED_AB»; «EXPLORED_BA»), and on the next step, the AR returns backward along its path to the next marked isthmus («RETREAT_A»; «RETREAT_B»). If the marked isthmus is the last one, the AR colors the nearest incidentor in «own» color («EXPLORED_AB»; «EXPLORED_BA»). On the next step, the AR notifies the AE about the exploration of all marked isthmuses by the other AR («RESET_A»; «RESET_B»). After that, the AR moves along the last isthmus to the foreign area, coloring the nearest incidentor in black. On the next step, the AR moves along the first explored isthmus back to its area, coloring the distant incidentor in black. The AR then moves forward to the end of its path, marked in «own» color.

5. *Simultaneous arrival of two agents at the same white node.* In the case of both agents arriving at the same white node at the same time, each agent colors half of the node, making it red-yellow. On the next step, agent B steps back along its path, removes the paint applied on the previous step from the nearer incident edge and node, colors the farther incident edge black («RETURN_B»), and switches to the mode of marking isthmuses. The edge on which the transition was made is already counted as the first isthmus due to the AE message «RETURN_B», and the length of the yellow path is reduced by one node. Note that agent A treats the red-yellow node as a red node while working along its path.

Priority of switching the ARs to one of the possible operating modes is distributed as follows: first, we check for the presence of marked isthmuses, so the highest priority is given to the isthmus exploration mode; then we check if there are isthmuses from the current node that can be marked for exploration by agent A , so the second priority will be given to the isthmus marking mode; next, we check for the presence of back edges from the current node, so the third priority will be the back edge exploration mode; lastly, the regular operating mode has the lowest priority. The operating mode of the ARs in case of both arriving at the same white node simultaneously is not considered, as in this case, agent A continues its work in the regular mode, and for agent B , choosing any other mode will be unavailable at that moment.

Let us consider the algorithm of the agent-experimenter:

Input: lists of messages M and N from the ARs.

Output: a list of nodes V_H and edges E_H of the graph H , isomorphic to the graph G .

Data: V_H , E_H lists of nodes and edges of the graph H . Ct_A , Ct_B – counters of the number of visited nodes of the graph G by agents A and B , respectively. AN , BN – variables, where a value of «1» gives agents A and B , respectively, a signal to return and explore the isthmuses, while a value of «0» informs the agents

that the crossings marked for exploration by the specific agent are absent. N_A, N_B – variables that store the numbers of the nodes from which agents A and B , respectively, last marked the isthmuses. F, K – the number of isthmuses from nodes N_A, N_B respectively, marked for exploration. Q, Z – variables used certain subroutines for working with isthmuses to store the values of variables F, K respectively, as they were at the beginning of the subroutines. M, N – lists of messages from agents A and B , respectively. E, L – variables used to mark whether the isthmus was marked by agent A or B on the previous step (value «1») or not (value «0»). i, j – counters used by agents A and B , respectively, to determine the numbers of the second nodes of marked isthmuses or the numbers of the second nodes of marked back edges. $STOP_A, STOP_B$ – variables used by agents A and B , respectively, to signal to the AE the completion of exploring their subgraph. UDP_A, UDP_B – logical variables used by agents A and B , respectively, to determine the coloring method of the incidentors of the isthmus being considered at a given moment. $UDOBRA, UDOBRA_B$ – logical variables used by agents A and B , respectively, to determine whether the considered back edge is the last of the marked ones. $KOBR_A, KOBR_B$ – variables in which agents A and B , respectively, store the number of marked back edges. $r(1), r(2), \dots, r(t)$ – a list of node numbers of the red path, where t is the length of this list. $y(1), y(2), \dots, y(p)$ – a list of node numbers of the yellow path, where p is the length of this list. Mes – the processing message.

```

1.  $AN := 0; BN := 0; N_A := 0; N_B := 0; F := 0; K := 0; M := \emptyset; N := \emptyset; E := 0; L := 0;$ 
 $i := 0; j := 0; E_H := \emptyset; Ct_A := 1; Ct_B := 2; V_H := \{Ct_A, Ct_B\}; t := 1; p := 1;$ 
 $r(t) := Ct_A; y(p) := Ct_B; UDP_A := False; UDP_B := False;$ 
 $UDOBRA := False; UDOBRA_B := False; KOBR_A := 0; KOBR_B := 0;$ 
 $STOP_A := 0; STOP_B := 0;$ 

```

```

2. while  $(STOP_A = 0) \text{ or } (STOP_B = 0)$  do

```

```

3. if  $M \neq \emptyset$  then do

```

```

4. read the message in  $Mes$  and delete it from  $M$ ;

```

```

5. LIST_PROC_A();

```

```

6. end do;

```

```

7. if  $N \neq \emptyset$  then do

```

```

8. read the message in  $Mes$  and delete it from  $N$ ;

```

```

9. LIST_PROC_B();

```

```

10. end do;

```

```

11. end do;

```

```

12. print  $V_H, E_H$ .

```

```

LIST_PROC_A():

```

```

1. if  $Mes = \text{"FORWARD\_A"}$  then FORWARD_A();

```

```

2. if  $Mes = \text{"BACK\_A"}$  then BACK_A();

```

```

3. if  $Mes = \text{"STOP\_A"}$  then STOP_A();

```

```

4. if  $Mes = \text{"MARK\_BE\_A"}$  then MARK_BE_A();

```

```

5. if  $Mes = \text{"RETREAT\_A"}$  then RETREAT_A();

```

```

6. if  $Mes = \text{"FORWARD\_BE\_A"}$  then FORWARD_BE_A();

```

```

7. if  $Mes = \text{"BE\_EXPLORED\_A"}$  then BE_EXPLORED_A();

```

```

8. if  $Mes = \text{"MARK\_AB"}$  then MARK_AB();

```

```

9. if  $Mes = \text{"FIX\_A"}$  then FIX_A();

```

```

10. if  $Mes = \text{"EXPLORED\_AB"}$  then EXPLORED_AB();

```

```

11. if  $Mes = \text{"RESET\_A"}$  then RESET_A();

```

```

FORWARD_A():  $Ct_A := Ct_A + 2; t := t + 1; r(t) := Ct_A; V_H := V_H \cup \{Ct_A\}$ 

```

```

 $E_H := E_H \cup \{(r(t-1), r(t))\};$ 

```

```

BACK_A(): an element  $r(t)$  is removed from the list  $r(1), r(2), \dots, r(t)$ ;  $t := t - 1;$ 

```

```

STOP_A():  $STOP_A := 1;$ 

```

```

MARK_BE_A():  $KOBR_A := KOBR_A + 1;$ 

```

```

RETREAT_A():  $i := i + 1;$ 

```

```

FORWARD_BE_A():  $KOBR_A := KOBR_A - 1; UDOBRA := (KOBR_A = 0);$ 

```

```

 $E_H := E_H \cup \{(r(t), r(t-i))\};$ 

```

```

BE_EXPLORED_A():  $i := 0;$ 

```

```

MARK_AB():  $F := F + 1; E := 1;$ 

```

```

RESET_A():  $N_A := Ct_A; BN := 1; E := 0; Q := F; UDP_A := (((F = Q) \text{ or } (F = 1)) \text{ and } (Q \neq 1));$ 

```

```

EXPLORED_AB():  $E_H := E_H \cup \{(N_B, r(t-i))\}; K := K - 1;$ 

```

```

 $UDP_B := (((K = Z) \text{ or } (K = 1)) \text{ and } (Z \neq 1));$ 

```

```

OBH_A():  $AN := 0; i := 0;$ 

```

The procedures for working with the message list from agent B that are not considered below are analogous to the procedures for working with the message list from agent A.

The procedure LIST_PROC_B() is the same as the procedure LIST_PROC_A(), except for an additional condition check and a subroutine call: «if Mes="RETURN_B" then RETURN_B();», which applies only to agent B and relates to the mode of simultaneous arrival of two ARs at the same white node.

RETURN_B(): $E_H := E_H \setminus \{(y(p-1), y(p))\}; V_H := V_H \setminus \{Ct\_B\}; Ct\_B := Ct\_B - 2;$
 $p := p - 1; y(p) := Ct\_B; L := 1; K := K + 1;$

Let us consider the properties of the presented graph exploration algorithm.

Provided that $n \geq 3$, the procedures FORWARD_A() and FORWARD_B() are each executed at least once.

In each of these procedures, one node of graph H is created. If both ARs simultaneously enter the same white node, these procedures will create two new nodes in graph H . The node created by agent B will be removed in the next step by the RETURN_B() procedure, as it duplicates the node created by agent A. Thus, the execution of the described algorithm induces a mapping $\varphi: V_G \rightarrow V_H$ of the nodes of graph G into the nodes of graph H . Moreover, $\varphi(v) = t$ (when node v is colored red and $t = Ct\_A$) and $\varphi(s) = p$ (when vertex s is colored yellow and $p = Ct\_B$). The given mapping naturally establishes an implicit numbering of the nodes of graph G . Moreover, the mapping φ is a bijection, since in a connected graph G , all nodes are reachable from the starting nodes. This means that all nodes are visited by the agents, i.e., they are colored red and yellow.

During the execution of the FORWARD_A() or FORWARD_B() procedure, the agent-explorer explores the tree edge (v, u) and numbers node u in such a way that the edge (v, u) uniquely corresponds to the edge $(\varphi(v), \varphi(u))$ in graph H .

During the execution of the EXPLORED_AB() or EXPLORED_BA() procedures, the AE explores the isthmus (v, u) of graph G and assigns it a unique correspondence with the edge $(\varphi(v), \varphi(u))$ of graph H . Therefore, φ is an isomorphism from graph G to graph H .

Theorem 1. Three agents, upon executing the exploration algorithm on graph G , explore the graph up to isomorphism.

Let's calculate the time, space, and communication complexities of the algorithm in a uniform scale. When calculating the time complexity of the algorithm, we assume that the initialization of the algorithm, the analysis of the neighborhood of the working node, and the selection of one of the possible procedures take a constant number of time units. We also assume that the selection of edges, the traversal over them by the AR, and the processing of messages from the AE received at this stage from the AR are all done in one time unit.

From the description of the algorithm, it follows that at each step of the algorithm, the red (yellow) path is a simple path connecting the initial node v (or s in the case of agent B) with number $\varphi(v) = 1$ ($\varphi(s) = 2$) to the node u (z) with number $\varphi(u) = Ct\_A$ ($\varphi(z) = Ct\_B$). Therefore, the total length of the red and yellow paths does not exceed n . Each time the procedures of the normal operating mode are executed, each agent explores one edge. This means that the procedures of the normal operating mode are executed no more than $2 \times (n - 1)$ times (considering that each AR will traverse each edge of its path twice). Therefore, the total execution time is estimated as $O(n)$.

During a single execution of the back edge exploration mode procedure, the agents mark no more than $n - 2$ back edges (since the graph is simple and at least one node is colored in the 'foreign' color), traverse no more than $n - 2$ edges of the red (yellow) path once, and traverse no more than $n - 2$ back edges twice. The time spent on the back edge exploration mode is estimated as $4 \times n \times O(n)$, i.e., $O(n^2)$.

During the execution of the isthmus marking mode procedures, the agents do not traverse isthmuses but simply color their adjacent incidentors. After that, they send a message to the AE about the completion of the isthmus marking mode. It also takes one move. Thus, the working time in this mode is estimated as $n \times O(n) + O(n)$, i.e., as $O(n^2)$.

During a single execution of the isthmus exploration mode procedure, the agents traverse no more than $n - 2$ edges of the red (yellow) path. After that, when marking the isthmuses as explored, the agents do not traverse the isthmus but simply color its adjacent incidentor. Once all marked isthmuses have been colored, the agents notify the AE, which takes one move. Upon returning after exploring all isthmuses, the agents may traverse at most two isthmuses once each, as well as no more than $n - 2$ edges of the red (yellow) path. The execution time of this mode is estimated as $O(n^2) + O(n^2) + O(n) + O(n) + O(n^2)$, i.e., as $O(n^2)$.

The agents' idle time while waiting is estimated in total as $O(n^2)$. Consequently, the overall time complexity of the algorithm satisfies the relation $T(n) = O(n^2)$. Thus, the upper bound on the number of edge traversals performed by the agent-researchers is estimated as $O(n)$. The space complexity of the algorithm is determined by the complexity of the lists $V_H, E_H, r(1) \dots r(t), y(1) \dots y(p)$, whose complexity is, in turn, defined by the values $O(n), O(n^2), O(n), O(n)$. Therefore, $S(n) = O(n^2)$.

At each step of the algorithm, the agents can send no more than four messages to the AE (including requests for values necessary to determine the operating mode) either separately or simultaneously and receive no more than three messages each. Therefore, the amount of information transmitted by the agents is estimated as $14 \times O(n^2)$. Consequently, $K(n) = O(n^2)$.

Taking into account the above assumptions about the method of calculating time complexity, the following theorem holds.

Theorem 2. The time, space, and communication complexities of the algorithm are $O(n^2)$, and the upper estimate of the number of transitions along the edges made by the agents is $O(n^2)$ where n is the number of nodes in the graph. The algorithm uses three colors.

Conclusions. This work presents a new method and a corresponding algorithm for graph exploration by a team of agents. The team consists of two agent-researchers that traverse an unknown graph and one stationary agent-experimenter, who explores the graph based on the results of the two traversing agents.

The main advantages of the proposed algorithm lie in the optimization of agent operations and communication processes, enabling the use of agent-researchers with finite memory independent of the graph size. This allows the same agents to be employed in environments where no prior information about the graph size is available. In our algorithm, only the stationary agent-experimenter possesses unboundedly growing internal memory, where the graph map is constructed.

Additionally, we analyzed the time, space, and communication complexities of the algorithm, which are bounded above by $O(n^2)$. The graph exploration process in our algorithm is implemented using only three colors. The number of colors does not depend on the graph parameters and remains a constant value.

Bibliography:

1. Banfi J., Quattrini Li, A., Rekleitis I. et al. Strategies for coordinated multirobot exploration with recurrent connectivity constraints. *Autonomous Robots*. 2018. Vol. 42. P. 875–894. <https://doi.org/10.1007/s10514-017-9652-y>
2. Dopp K. Automaten in labirinth. *Electronische Informationsverarbeitung und Kybernetik*. 1971. V.7, № 2. P. 79–94.
3. Dudek G., Jenkin M. Computational principles of mobile robotics. *Cambridge Univ. press*. 2000. 280 p.
4. Dudek G., Jenkin M., Miliot E., Wilkes D. Map validation in a graphlike world. *Proceedings of the 13th International Joint Conference on Artificial Intelligence*. San Fransisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1993. P. 1648–1653.
5. Goth G. Exploring new frontiers. *Communications of the ACM*. 2009. 52(11). C. 21–23.
6. Nagavarapu S. C., Vachhani L., Sinha A. et al. Generalizing Multi-agent Graph Exploration Techniques. *International Journal of Control, Automation and Systems*. 2020. <https://doi.org/10.1007/s12555-019-0067-8>
7. Sapunov S. V. Experiments on Recognition of Infinite Grid Graph Labelling. *Праці ІПММ НАН України*, 2021. 35 (1), 67–78. <https://doi.org/10.37069/1683-4720-2021-35-6>
8. Sapunov S. V. Minimal Deterministic Traversable Vertex Labelling of Infinite Square Grid Graph. *Праці ІПММ НАН України*, 2020. 34, 118–132. <https://doi.org/10.37069/1683-4720-2020-34-12>
9. Sapunov S. V. Directional Movement of a Collective of Compassless Automata on a Square Lattice of Width 2. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2024. vol. 60, iss. 6, pp. 899–906. <https://doi.org/10.1007/s10559-024-00727-x>
10. Shannon C. E. Presentation of a maze-solving machine. *Cybernetics Trans, of the 8 th Conf. of the JosiahMacy Jr. Found* / Editor: H. Foerster. 1951. P. 173–180.
11. Stepkin A. Using a Collective of Agents for Exploration of Undirected Graphs. *Cybernetics and Systems Analysis*. V.51, 2. 2015 223–233. <https://doi.org/10.1007/s10559-015-9715-z>
12. Stopkin A. V. Algorithm for exploration of a simple undirected graph by a collective of agents. *Scientific Notes of Taurida VI Vernadsky National University*, 2024, vol. 35 (74), no. 5, pp. 303–309. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/43>
13. Stopkin A. V. Multi-agent system for non-oriented graphs exploration. *Information Technology and Society*, Kyiv, 2024, vol. 3, no. 14, pp. 38–43. <https://doi.org/10.32689/maup.it.2024.3.5>
14. Stopkin A. V. Finite graph exploration by a mobile agent. *Mathematical Modeling and Computing*, 2025, vol. 12, no. 1, pp. 75–82. <https://doi.org/10.23939/mmc2025.01.075>
15. Wang H., Jenkin M., Dymond P. Enhancing exploration in graph-like worlds. *Proceedings of the Canadian Conference on Computer and Robot Vision (CCRV)*. 2008. P. 53–60.

УДК 654.9

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.33>**Оксана ТИМОЩУК***кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри математичних методів системного аналізу Інституту прикладного системного аналізу, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»***ORCID:** 0000-0003-1863-3095**Еміль ЛЮТФАЛІЄВ***аспірант Інституту прикладного системного аналізу, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», eliutfaliiev@gmail.com***ORCID:** 0009-0009-9070-6632

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ТРАЄКТОРІЙ РУХУ АТМОСФЕРНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ЩОДО МОЖЛИВОСТІ ЇХ ПОКРАЩЕННЯ

Анотація. У статті подано структурований аналіз сучасних підходів до планування траєкторій польоту атмосферних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) з акцентом на взаємозв'язок понять «траєкторія», «маршрут» і «навігація» в автономних системах керування. Узагальнено міждисциплінарні тлумачення цих категорій з урахуванням позицій авіації, теорії керування, кібернетики та штучного інтелекту, що дозволяє уточнити їх роль у логіці навігації в умовах невизначеності. Наведено порівняльний огляд методів планування, включаючи класичні кінематичні моделі, фільтрацію Калмана, евристичні алгоритми (поля потенціалів, роїння), а також інтелектуальні підходи, зокрема нейронні мережі й навчання з підкріпленням. Оцінювання здійснено за критеріями точності, адаптивності, обчислювальної складності та енергоефективності.

Результати свідчать, що класичні моделі забезпечують високу точність у структурованих умовах, однак виявляють обмеження при зміні зовнішнього середовища. Натомість методи ШІ демонструють гнучкість та здатність до навчання, але потребують значних ресурсів і попереднього навчання. Окреслено типові обмеження в реальних умовах – складна місцевість, погодні зміни, багатобачкові рішення – та запропоновано шляхи вдосконалення: використання онлайн-навчання, генеративних моделей ШІ (GPT, дифузійні моделі), а також багатокритеріальної оптимізації. Запропоновано гібридну архітектуру планування траєкторій, що поєднує аналітичні моделі з адаптивними інтелектуальними шарами для автономного управління в змінному середовищі. Результати сприяють розвитку інтелектуальних систем підтримки рішень для БПЛА нового покоління.

Ключові слова: атмосферні літальні апарати, траєкторія руху, маршрут, навігація, автономне керування, планування траєкторії, адаптивні системи, БПЛА, алгоритми оптимізації, штучний інтелект.

Oksana TYMOSHCHUK, Emil LUTFALIEV. ANALYSIS OF EXISTING METHODS FOR DETERMINING THE TRAJECTORIES OF ATMOSPHERIC AIRCRAFT FOR THE POSSIBILITY OF THEIR IMPROVEMENT

Abstract. The article provides a structured analysis of current approaches to flight trajectory planning for atmospheric unmanned aerial vehicles (UAVs), emphasizing the conceptual interplay between «trajectory», «route», and «navigation» within autonomous control systems. The research generalizes interdisciplinary interpretations of these terms, drawing from aviation, control theory, cybernetics, and artificial intelligence, to clarify their impact on navigation logic under uncertainty. A comparative review of planning methods is presented, including classical kinematic models, Kalman filtering, heuristic algorithms (e.g., potential fields, swarm optimization), and AI-driven techniques such as neural networks and reinforcement learning. These approaches are evaluated based on accuracy, adaptability, computational cost, and energy efficiency. Findings show that classical methods offer precision and predictability in structured settings, but struggle to adapt to dynamic environments. AI methods demonstrate higher adaptability and learning potential but require significant computational resources and training datasets. The article outlines key limitations typical for complex missions – such as unpredictable weather, urban obstacles, and real-time decision-making across multiple agents – and proposes directions for improvement. Suggested solutions include the integration of online learning, the use of generative AI models (e.g., GPT, diffusion models), and the implementation of multi-objective optimization techniques tailored to operational constraints.

The study introduces a hybrid trajectory planning architecture combining deterministic models with intelligent adaptive layers that support autonomous control in changing environments. The proposed framework enhances UAV mission flexibility, reliability, and autonomy, contributing to the development of intelligent decision-support systems for next-generation aerial robotics.

Key words: atmospheric aerial vehicles, trajectory, route, navigation, autonomous control, trajectory planning, adaptive systems, UAVs, optimization algorithms, artificial intelligence.

Постановка проблеми. У контексті зростання використання атмосферних літальних апаратів, зокрема безпілотних, виникає потреба у розробці високоточного, адаптивного та енергоефективного планування траєкторій, здатного враховувати складність і динаміку реального середовища. Існуючі методи або обмежені в здатності реагувати на зміни, або вимагають значних обчислювальних ресурсів, що ускладнює їх використання в умовах обмежених бортових потужностей. Відсутність уніфікованого

підходу до трактування ключових понять, таких як «траєкторія», «маршрут» і «навігація», також перешкоджає інтеграції різних методів у цілісні керуючі системи.

Метою статті є здійснення системного аналізу існуючих методів формування траєкторій руху атмосферних літальних апаратів з урахуванням сучасних підходів до трактування понять «маршрут» і «навігація», оцінка ефективності відповідних алгоритмів та визначення перспективних напрямів їх удосконалення для забезпечення автономного, адаптивного й енергоефективного керування польотом.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Сучасні дослідження вказують на необхідність інтеграції маршрутного і навігаційного рівнів у єдину систему, здатну до адаптації та самонавчання в умовах зовнішніх змін. Так, У роботі S.M. LaValle [8] маршрут трактується як конфігураційна послідовність точок, яка формується з урахуванням обмежень простору. P. Zarchan [10] розширює це поняття, включаючи в нього метеоумови, логістику і зони ризику. У дослідженні D. Mellinger і V. Kumar [9] маршрут розглядається як параметрична крива, оптимізована за критерієм мінімізації ривка з урахуванням динаміки апарата. Ю. Авер'янова, А. Рудякова, Ф. Яновський [1] акцентують увагу на ролі навігації в корекції траєкторії, що забезпечується метеонавігаційними сенсорами. У свою чергу, Шерстюк та ін. [6, 7] пропонують адаптивну модель, яка використовує мультисенсорні дані для перебудови маршруту в реальному часі.

Виклад основного матеріалу. Для аналізу методів формування траєкторій руху атмосферних літальних апаратів важливо уточнити значення понять «траєкторія руху», «маршрут» і «навігація». Їхні тлумачення у фаховій літературі різняться залежно від галузі, що потребує міждисциплінарної систематизації. У цьому розділі узагальнено наукові підходи до трактування цих термінів як основи для подальшого аналізу методів траєкторного планування в автономних системах керування.

У науковій літературі термін «траєкторія руху» атмосферного літального апарата досліджувався в контексті як механіки польоту, так і кібернетичних систем навігації та керування. Його трактування залежить від предметної області, в межах якої розглядається цей термін, що спричинило розмаїття підходів до його формалізації (табл. 1).

Таблиця 1

Узагальненням результатів дослідження поняття «траєкторія руху» в наукових дослідженнях

Автор	Джерело	Опис підходу до терміну «траєкторія руху»
P. Zarchan [10]	Tactical and Strategic Missile Guidance.	Траєкторія розглядається як фізично зумовлений просторово-часовий шлях об'єкта, що обчислюється на основі рівнянь руху
S.M.LaValle [8]	Planning Algorithms	Траєкторія описується як оптимальний шлях у конфігураційному просторі, що відповідає обмеженням системи керування
D. Mellinger, V. Kumar [9]	Minimum Snap Trajectory Generation and Control for Quadrotors	Траєкторія подається як параметрична крива, побудована на основі мінімізації ривка з урахуванням динаміки літального апарата
В.Г. Шерстюк, Р.М. Левківський, В.М. Гусев [6,7]	Динамічне планування траєкторій БПЛА	Траєкторія – як гібридна модель, що поєднує аналітичне передбачення маршруту з адаптивною реакцією на зовнішні зміни
А.Л. Загора, В.В. Сазонов [3]	Оптимізація траєкторій мобільних роботів	Траєкторія формується як рішення задачі багатокритеріальної оптимізації у середовищі з перешкодами

У класичному підході, що базується на механіці, одним із провідних авторів вважається P. Zarchan [10], який у своїй праці Tactical and Strategic Missile Guidance підкреслює значення траєкторії як результату розв'язання рівнянь руху об'єкта під дією аеродинамічних, гравітаційних і керувальних сил. У його підході траєкторія – це математична проекція фізичного руху, що визначається як функція часу для координат у просторовій системі.

З позицій теорії керування важливий внесок зробили S. M. LaValle [8] у монографії Planning Algorithms, де траєкторія трактується як результат оптимального керування з урахуванням обмежень динаміки системи та середовища. У цьому підході траєкторія визначається як безперервна функція, що з'єднує початкову та кінцеву точки в конфігураційному просторі, яка задовольняє умови досяжності та динамічної реалізованості.

В українських дослідженнях поняття «траєкторія руху» аналізується у працях В. Г. Шерстюка, Р. М. Левківського та В. М. Гусева [6, 7], які у своїх роботах акцентують увагу на безпечному та реактивному

плануванні руху безпілотних апаратів в умовах змінного середовища. Автори пропонують розглядати траєкторію як результат поєднання аналітичного планування та адаптивної корекції в реальному часі, що дозволяє підвищити гнучкість при виконанні місій в урбанізованому або загрозовому середовищі.

Застосування штучного інтелекту до генерації траєкторій також обумовлює нові трактування. Наприклад, Mellinger і Kumar [9] у контексті квадрокоптерів пропонують визначати траєкторію як множину параметричних кривих, згенерованих із врахуванням умов плавності, мінімізації ривка (jerk) і фізичних обмежень апарата. Такий підхід формалізує траєкторію як об'єкт оптимізаційного процесу, де цільова функція включає множину критеріїв керуваності.

Таким чином, аналіз літератури свідчить про те, що термін «траєкторія руху» має міждисциплінарну природу: у механіці польоту він відображає фізичну реалізацію руху; в теорії керування – динамічно допустимий зв'язок між станами; у штучному інтелекті – результат оптимізації в умовах багаточільових задач. Це зумовлює потребу у формуванні інтегрованого понятійного апарату для побудови універсальних моделей траєкторного планування.

Поняття «траєкторія руху» є фундаментальним у системах керування польотом атмосферних літальних апаратів. У попередньому розгляді траєкторія була охарактеризована як безперервний просторово-часовий шлях, який формується під впливом зовнішніх та внутрішніх факторів і описується у рамках механіко-математичних або кібернетичних моделей. Проте для повноцінного функціонування навігаційно-керуючих систем цього визначення недостатньо, оскільки траєкторія руху не є ізольованою сутністю. Вона реалізується як результат поєднання двох взаємозалежних елементів – маршруту та навігації, кожен з яких виконує окрему, але взаємодоповнюючу функцію у побудові й дотриманні бажаної траєкторії. Зокрема, маршрут формує стратегічну конфігурацію руху, що визначає основні орієнтири місії, тоді як навігація забезпечує тактичну адаптацію руху відповідно до змінних умов середовища та параметрів простору. Саме тому системний аналіз дефініцій цих понять у сучасній науковій літературі дозволяє глибше зрозуміти концептуальні основи формування траєкторій літальних апаратів. У наукових джерелах терміни «маршрут» і «навігація» розглядаються крізь призму міждисциплінарних підходів, зокрема в галузях робототехніки, аеронавігаційних систем, систем керування польотом і штучного інтелекту. У таблиці 2 представлено узагальнені авторські інтерпретації цих понять.

Таблиця 2

Порівняльний огляд ключових інтерпретацій понять «маршрут» і «навігація» у працях провідних дослідників

Автор	Назва публікації	Наукова інтерпретація поняття
LaValle S. M. [8]	Planning Algorithms	Маршрут трактується як конфігураційна послідовність точок, сформована до початку руху. Підхід ґрунтується на аналізі конфігураційного простору з урахуванням обмежень навколишнього середовища.
Zarchan P. [10]	Tactical and Strategic Missile Guidance	Маршрут розглядається як логістично обґрунтований вектор руху, який включає повітряні коридори, зони підвищеного ризику та вплив погодних умов.
Mellinger D., Kumar V. [9]	Minimum Snap Trajectory Generation and Control for Quadrotors	Автори пропонують трактування маршруту як параметризованої функції, що оптимізується за критерієм мінімізації ривка з урахуванням динамічних обмежень літального апарата.
Авер'янова Ю., Рудякова А., Яновський Ф.[1]	Оперативна корекція траєкторії повітряного судна..	Навігація описується як динамічний процес визначення положення, швидкості та орієнтації літального апарата у просторі з метою уточнення траєкторії руху.
Шерстюк В. Г., Левківський Р. М. та ін. [6,7]	Метод пошуку безпечних траєкторій руху БПЛА	Навігація подається як адаптивна система, що забезпечує перебудову маршруту на основі мультисенсорної інформації в режимі реального часу.
Mashkov O., Trysnyuk V. та ін. [5]	Новий підхід до синтезу відновлюючого керування..	Навігація трактується як інтегрований канал зворотного зв'язку, що забезпечує реактивне керування та прийняття рішень у змінному середовищі.

Опис досліджень, присвячених дефініціям понять «маршрут» та «навігація», у контексті управління рухом атмосферних літальних апаратів, виявляє змістовні відмінності між підходами інженерних, кібернетичних та навігаційних шкіл, що дозволяє простежити еволюцію термінів у міждисциплінарному полі.

Поняття «маршрут» традиційно використовується для опису заздалегідь визначеної або оптимізованої послідовності контрольних точок, які з'єднують початкове і кінцеве положення об'єкта.

У фундаментальних дослідженнях, таких як LaValle [8], маршрут розглядається як частина конфігураційного простору, що апіорно формується за допомогою алгоритмів пошуку шляху (наприклад, A* або RRT) до моменту початку руху.

У працях Zarchan [10] маршрут пов'язується з місією польоту, яка включає логістику повітряного переміщення та обліковує повітряні коридори, зони ризику, метеоумови, що вимагає від системи керування підтримання не лише геометричної, а й операційної цілісності маршруту. У пізніших роботах, зокрема Mellinger & Kumar [9], маршрут стає частиною параметризації траєкторії, яка генерується через оптимізацію за гладкістю (snap, jerk) і динамічними обмеженнями. Таким чином, сучасна інтерпретація маршруту фокусується не лише на геометрії руху, а й на контексті середовища, в якому реалізується місія апарата.

Щодо дефініції «навігація», то в дослідженнях Аверянової [1] навігація визначається як процес динамічного визначення просторового положення та параметрів руху з метою подальшого формування або уточнення траєкторії. У сучасних роботах поняття навігації охоплює не лише вимірювання координат, але і синтез відповідей на їх зміну. Шерстюк та ін. [6, 7] пропонують розглядати навігацію в комплексі з адаптивною маршрутизацією, де навігаційні дані слугують вхідними сигналами для перебудови поточного маршруту. Автори наголошують на важливості мультисенсорного підходу (інерційні, супутникові, візуальні сенсори), що забезпечує підвищення точності в умовах високої динаміки та невизначеності.

Крім того, у роботах Mashkov [5] зазначається, що навігація виступає не лише засобом позиціонування, а й каналом адаптації у контексті реактивного управління. У межах цієї парадигми навігаційна система є інтегральним елементом механізму ухвалення рішень щодо актуального вибору поведінки літального апарата.

Отже, аналіз літератури демонструє, що маршрут вважається детермінованою основою місії, що генерується на основі стратегічних параметрів середовища, тоді як навігація – це процес безперервного відтворення актуального стану об'єкта у просторі, який забезпечує зворотний зв'язок для підтримання або корекції маршруту і траєкторії. Обидва поняття формують функціональне ядро для розробки автономних систем управління літальними апаратами.

З'ясування змістового наповнення понять «траєкторія», «маршрут» і «навігація» дозволяє перейти до наступного етапу дослідження – вивчення конкретних методів, які забезпечують побудову, уточнення й адаптацію траєкторій руху атмосферних літальних апаратів. У сучасній науково-прикладній практиці використовуються як класичні аналітичні моделі, так і алгоритми, що базуються на машинному навчанні. Їх ефективність залежить від умов застосування, доступу до даних, потужності обчислювальних систем та цілей польоту. В таблиці 3 подано порівняльну характеристику основних підходів.

Кінематичне моделювання використовує базові рівняння руху без урахування силових або стохастичних впливів. Такий підхід дозволяє швидко будувати статичні траєкторії у заздалегідь відомих умовах. Моделі цього типу підходять для задач, де середовище не змінюється або контроль над параметрами високий. Основним недоліком є те, що такі моделі не враховують зовнішніх перешкод, змін погодних умов або поведінкових адаптацій літального апарата.

Таблиця 3

Порівняльна таблиця методів оптимізації траєкторій

Метод	Тип підходу	Переваги	Обмеження
Кінематичне моделювання	Аналітичне	Простота, швидкість, низькі обчислювальні витрати	Відсутність адаптивності, слабка реакція на змінні умови
A*, D*, RRT	Графовий пошук	Гнучкість у складних середовищах, можливість динамічного оновлення	Висока складність при великій кількості вузлів, залежність від параметрів
Гradientні, генетичні, ройові алгоритми	Оптимізаційне	Пошук глобальних рішень, багатокритеріальність	Високі ресурси, можливість потрапляння у локальні мінімуми
Фільтр Калмана	Статистичне згладжування	Висока точність у трасуванні, об'єднання сенсорних даних	Вимоги до коректності моделей, чутливість до шумів
Нейромережі, RL, гібридні системи	Штучний інтелект	Самонавчання, реактивність, адаптація до середовища	Висока складність, потреба у даних, низька прозорість роботи

Алгоритми маршрутизації (A^* , D^* , RRT) базуються на поданні простору у вигляді графа або дерева, де вузли відповідають допустимим положенням, а ребра – можливим переходам між ними.

- A^* виконує евристичний пошук найкоротшого шляху з урахуванням вартості,
- D^* дозволяє оперативно змінювати шлях при зміні конфігурації простору,
- а RRT – ефективний у просторі з великою кількістю ступенів свободи. Переваги – гнучкість, масштабованість; обмеження – чутливість до параметрів та висока обчислювальна вартість при складній топології.

Гradientні методи (наприклад, метод найшвидшого спуску) добре підходять для задач з гладкою функцією вартості, однак схильні до попадання в локальні мінімуми. Генетичні алгоритми і ройові системи (наприклад, Particle Swarm Optimization) дають змогу знаходити рішення у складних або шумних просторах. Такі методи забезпечують багатокритеріальний підхід (безпека, енерговитрати, тривалість польоту), проте потребують складної настройки й великої кількості ітерацій (табл. 4).

Таблиця 4

Порівняльна характеристика методів планування траєкторій за ключовими критеріями

Метод	Точність	Швидкодія	Гнучкість до змін середовища	Обчислювальні ресурси
Кінематичне моделювання [10]	Висока	Висока	Низька	Низькі
A^* , D^* , RRT [8]	Середня	Середня/висока	Середня/висока	Середні
Гradientні, генетичні, ройові [3,6,7]	Середня	Низька/середня	Висока (особливо ройові)	Високі
Фільтр Калмана [2,4]	Висока	Висока	Середня	Середні
Нейромережі, RL, гібридні системи [5]	Висока (залежно від навчання)	Середня	Висока	Високі

Фільтр Калмана забезпечує оптимальну оцінку стану системи на основі неповної або зашумленої інформації від сенсорів. Його застосування є доцільним для трасування фактичної траєкторії з метою порівняння з заданою або для компенсації відхилень. Фільтр є ефективним у системах навігації, де можливе об'єднання даних з GPS, IMU та інших джерел. Недоліки пов'язані з припущенням про лінійність системи та нормальний розподіл шумів.

Сучасні підходи використовують нейромережі для прогнозування дій або вибору траєкторії за даними з сенсорів та середовища. Навчання з підкріпленням (reinforcement learning) дозволяє системі самостійно вдосконалювати поведінку в процесі експлуатації. Гібридні архітектури поєднують класичні моделі з AI-підходами, що забезпечує адаптивність, але вимагає значних обчислювальних ресурсів, великих обсягів навчальних даних і створює труднощі для сертифікації через «чорну скриньку» рішень.

З урахуванням розглянутих підходів до формування траєкторій руху атмосферних літальних апаратів доцільним є проведення порівняльного аналізу їхньої ефективності відповідно до визначених критеріїв. Такий аналіз дозволяє виявити сильні та слабкі сторони кожного з методів у контексті точності, швидкодії, адаптивності до змін середовища та вимог до обчислювальних ресурсів. Зіставлення зазначених характеристик створює підґрунтя для формулювання висновків щодо придатності окремих рішень до використання в умовах різної складності та динаміки зовнішнього середовища.

У точності домінують фільтри Калмана й аналітичні моделі, які дозволяють досягти високої узгодженості між заданими та фактичними траєкторіями. Водночас методи на основі штучного інтелекту (нейромережі, reinforcement learning) демонструють кращі результати в умовах нестандартних ситуацій, однак можуть поступатися у прогнозованості результатів.

Швидкодія забезпечується в основному простими моделями та алгоритмами маршрутизації (зокрема D^*), які дозволяють оперативно перебудовувати шлях за змінених умов. Проте при масштабуванні системи або при збільшенні розмірності конфігураційного простору ці алгоритми потребують суттєвої оптимізації.

Щодо гнучкості, то найкращі результати демонструють методи навчання з підкріпленням та гібридні архітектури, які здатні адаптуватися до динаміки середовища на основі досвіду або багатовисхідного зворотного зв'язку. Водночас класичні алгоритми (кінематичні, gradientні) є переважно статичними та не передбачають змін структури рішення без перезапуску моделі.

У частині обчислювальних ресурсів найменш вимогливими є аналітичні підходи, а найресурсомінішими – неймережеві та еволюційні алгоритми. Це особливо важливо для безпілотних платформ з обмеженими можливостями обробки даних на борту.

У реальних умовах існують низка ситуацій, які знижують ефективність траєкторного планування незалежно від обраної моделі:

Складні рельєфи та міські умови: методи графового пошуку (наприклад, A*) часто створюють неефективні маршрути через велику кількість вузлів і перешкод. Також нейронні мережі, навчені в однорідному середовищі, можуть давати хибні результати.

Змінна погода: кінематичні та аналітичні моделі не враховують погодних змін, що знижує безпеку польоту. RL-підходи можуть демонструвати реактивність, але потребують навчання на погодних сценаріях.

Багатофакторні ризики: коли одночасно змінюються кілька параметрів (наприклад, вітрові умови, втрата сигналу, конфліктні траєкторії інших апаратів), більшість традиційних алгоритмів не можуть дати оптимальне рішення без інтеграції додаткових даних або адаптивної перебудови.

Розвиток інтелектуальних систем керування атмосферними літальними апаратами потребує не лише використання існуючих методів, але й їх глибокої модернізації відповідно до вимог динамічного, багатофакторного середовища. На цьому етапі ключовими напрямками удосконалення виступають інтеграція адаптивних механізмів, використання інструментів штучного інтелекту нового покоління, а також впровадження мультикритеріальних стратегій оптимізації. Ці підходи дають змогу формувати більш гнучкі, енергоефективні й стійкі до невизначеності системи планування траєкторій.

Одним із перспективних напрямів удосконалення є включення до системи керування механізмів онлайн-адаптації на основі навчання в процесі експлуатації. Такі моделі здатні оновлювати параметри планування в реальному часі, враховуючи змінні умови польоту, збої в сенсорних даних або появу нових перешкод. Онлайн-навчання дозволяє системі накопичувати досвід і вдосконалювати траєкторні рішення з кожною новою місією, підвищуючи ефективність керування без потреби повного перепланування.

Новітні генеративні моделі, такі як GPT (Generative Pre-trained Transformers), diffusion models та інші, відкривають можливість не лише до прогнозування станів, а й до генерації потенційних траєкторій з урахуванням складних просторово-часових зв'язків. Ці моделі можуть застосовуватися для створення сценаріїв польоту в умовах невизначеності, адаптації до нових ситуацій, а також для синтезу альтернативних рішень при виникненні конфліктів між маршрутом і умовами середовища. Генеративні ШІ мають потенціал значно прискорити процес побудови траєкторії при збереженні її адаптивності та обґрунтованості.

Удосконалення планування вимагає переходу від одномірних цільових функцій до багатокритеріальних моделей, які враховують енергетичні витрати, ризики безпеки, часові обмеження та інші стратегічні параметри одночасно. Мультикритеріальна оптимізація дозволяє балансувати між потенційно суперечливими цілями: мінімізацією тривалості польоту, максимізацією енергоефективності та забезпеченням проходження через безпечні зони. У цьому контексті важливу роль відіграють методи зважування критеріїв, побудова множин Парето та використання еволюційних стратегій.

Здатність оперативно реагувати на зміни в навколишньому середовищі, обхід нових перешкод і динамічне переналаштування параметрів траєкторії становить основу реактивного планування. Такі системи комбінують прогнозування подій із постійним оновленням поточного маршруту без потреби у повному перебудовуванні всієї траєкторії. Реалізація реактивного планування вимагає використання високопродуктивних обчислювальних платформ та синхронізації з поточними навігаційними і сенсорними даними.

Оптимальним напрямом удосконалення є розроблення гібридної архітектури системи планування, яка поєднує аналітичні та інтелектуальні компоненти. Зокрема, класичні моделі можуть забезпечувати базову стабільність та логіку руху, тоді як модулі ШІ відповідатимуть за адаптацію, генерацію альтернативних рішень та стратегічне прогнозування. Така архітектура має включати три шари: базовий (кінематичне моделювання), адаптивний (реактивна перебудова маршруту) та когнітивний (прогнозно-оцінювальні рішення ШІ). Це забезпечить не лише гнучкість, але й підвищить надійність траєкторного планування в умовах динамічних, багатофакторних середовищ.

Висновки. У статті здійснено системний аналіз існуючих методів формування та оптимізації траєкторій руху атмосферних літальних апаратів із позицій їх точності, адаптивності, швидкодії та ресурсної ефективності. Показано, що жоден з підходів не є універсальним, а ефективність їх застосування залежить від конкретних умов середовища й цілей польоту. Встановлено, що перспективними напрямками удосконалення є інтеграція адаптивного навчання, впровадження генеративних моделей ШІ,

використання мультикритеріальної оптимізації та реактивного планування. Запропоновано концепцію гібридної архітектури траєкторного планування, яка поєднує класичні алгоритми з інструментами штучного інтелекту, що створює передумови для підвищення автономності, безпеки та енергоефективності сучасних літальних систем.

Список використаних джерел:

1. Авер'янова Ю., Рудякова А., Яновський Ф. Оперативна корекція траєкторій повітряних суден на основі інформації бортових метеорологічних радіолокаторів. *Вісник Національного авіаційного університету*. 2020. № 85(4). С. 13–20. DOI: <https://doi.org/10.18372/2306-1472.85.15133>.
2. Даник Ю., Мазур В., Балицький І. Методологічні основи безпечного руху безпілотних літальних апаратів в просторі з динамічними перешкодами. 36. наук. пр. *Нац. акад. Держ. прикордон. служби України. Серія: Військові та технічні науки*. 2021. № 82(1). С. 224–236. DOI: <https://doi.org/10.32453/3.v82i1.541>.
3. Загора А. Л., Сазонов В. В. Оптимізація траєкторії руху інтелектуальних мобільних роботів при дистанційному зондуванні земель лісового фонду. *Journal of Rocket-Space Technology*. 2021. № 29(4). С. 190–193. DOI: <https://doi.org/10.15421/452121>.
4. Кривоножко А. М., Толкаченко Є. А., Опенько П. В. Розробка методу визначення параметрів поступального й обертального руху оптичного джерела реєстрації безпілотного літального апарата. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2020. № 4(41). С. 79–85. DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2020.41.09>.
5. Машков О., Триснюк В., Мамчур Ю., Жукаускас С., Нігородова С., Курило А. Новий підхід до синтезу відновлюючого керування для дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*. 2019. № 1(19). С. 69–77. DOI: [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2019-1\(19\)-69-77](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2019-1(19)-69-77).
6. Шерстюк В. Г., Левківський Р. М., Гусєв В. М., Сокол І. В., Доровська І. О. Метод пошуку безпечних траєкторій руху безпілотних апаратів. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2021. № 76(1). С. 113–125. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2021.1.14>.
7. Шерстюк В., Сокол І., Гусєв В., Левківський Р. Динамічне планування траєкторій руху безпілотних апаратів в процесі виконання складних операцій. *Problems of Information Technologies*. 2020. № 27. С. 7–22. DOI: <https://doi.org/10.35546/2313-0687.2020.27.7-22>.
8. LaValle S. M. *Planning Algorithms*. Cambridge : Cambridge University Press, 2006. URL: <https://planning.cs.uiuc.edu>.
9. Mellinger D., Kumar V. Minimum Snap Trajectory Generation and Control for Quadrotors. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2011. P. 2520–2525. DOI: 10.1109/ICRA.2011.5980409.
10. Zarchan P. *Tactical and Strategic Missile Guidance*. 6th ed. Reston : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012. 832 p. DOI: 10.2514/4.102400.

UDC 004.932:621.397.424:311.21](045)
DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.34>

Maksym TISHKOV

Postgraduate Student at the Department of Mathematical Methods of System Analysis, Educational and Scientific Institute of Applied System Analysis, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»maksym.tishkov@gmail.com

ORCID: 0009-0006-1741-9977

Oksana TYMOSHCHUK

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Mathematical Methods of System Analysis, Educational and Scientific Institute of Applied System Analysis, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» tymoshchuk.oksana@lil.kpi.ua

ORCID: 0000-0003-1863-3095

**PEDESTRIAN SPEED ESTIMATION METHOD APPLICATION FOR STATISTICAL ANALYSIS
OF CROWD DYNAMICS**

Abstract. This paper addresses the problem of pedestrian detection, tracking, and gait speed estimation based on video footage from a surveillance camera positioned above the walking area. Such a configuration is typical for surveillance systems in public spaces. The method proposed by the authors does not require any specialized equipment, making it suitable for a wide range of real-world scenarios.

The aim of this study is to evaluate the previously developed method for pedestrian speed estimation in a real-life case – video surveillance in a school corridor. The research seeks to assess the effectiveness and reliability of the algorithm under conditions that differ from a controlled laboratory environment.

Research methodology. To test the method, a video recording was conducted in a school corridor, where a surveillance camera captured pedestrian flows over a period of 6.5 hours. Using computer vision algorithms, pedestrians were detected, their trajectories tracked, and walking speeds estimated. In total, 1,841 trajectories were extracted, with an average walking speed of 1.15 m/s. The collected data enabled a statistical analysis that revealed patterns of pedestrian traffic under both normal and emergency conditions.

Scientific novelty. The study presents the first real-world validation of the previously proposed method, implemented without any prior environmental preparation or the use of additional sensors. A distinguishing feature of the experiment is the consideration of external factors, particularly regular air raid alerts occurring during wartime in Ukraine. Their impact on pedestrian behavior was identified and reflected in the analytical results. This approach contributes to a deeper understanding of human adaptive behavior in stressful situations.

Conclusions. The conducted study confirmed the effectiveness of the previously developed method for pedestrian detection, tracking, and speed estimation in real-world conditions. The obtained results can be used to further improve decision support systems in the fields of safety, evacuation planning, and crowd behavior analysis. The use of real data and the inclusion of a crisis context significantly enhance the practical value of the proposed methodology.

Key words: computer vision, object tracking, gait speed estimation, video surveillance, deep learning, crowd monitoring.

**Максим ТІШКОВ, Оксана ТИМОЩУК. ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ОЦІНКИ ШВИДКОСТІ ПІШОХОДІВ
ДЛЯ СТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ ДИНАМІКИ НАТОВПУ**

Анотація. У статті розглянуто задачу виявлення, відстеження та оцінки швидкості руху пішоходів на основі відеозаписів із камери спостереження, встановленої над зоною пересування. Така конфігурація є типовою для систем відеоспостереження в публічних просторах. Запропонований авторами метод не потребує жодного спеціалізованого обладнання, що дозволяє використовувати його в широкому спектрі реальних сценаріїв.

Метою роботи є апробація створеного раніше методу оцінки швидкості руху пішоходів на практичному прикладі з реального життя – відеоспостереження у шкільному коридорі. Дослідження має на меті перевірити ефективність і надійність алгоритму в умовах, які відрізняються від лабораторного середовища.

Методологія дослідження. Для випробування методу була організована зйомка в коридорі навчального закладу, де камера фіксувала пішохідні потоки протягом 6,5 годин. За допомогою алгоритмів комп'ютерного зору здійснювалося виявлення пішоходів, відстеження траєкторій та оцінка швидкості руху. Усього було отримано 1841 траєкторію, а середня швидкість руху склала 1,15 м/с. На основі зібраних даних проведено статистичний аналіз, що дозволив оцінити динаміку пішохідного трафіку у звичайних та екстрених умовах.

Наукова новизна. У роботі вперше апробовано раніше запропонований метод у реальних умовах, без попередньої підготовки середовища чи залучення додаткових сенсорів. Особливістю дослідження є врахування зовнішніх чинників, зокрема регулярних повітряних тривог, що відбуваються під час війни в Україні. Їхній вплив на поведінку пішоходів був ідентифікований та відображений у результатах аналізу. Такий підхід дозволяє глибше зрозуміти адаптивну поведінку людей у стресових ситуаціях.

Висновки. Проведене дослідження підтвердило ефективність розробленого раніше методу виявлення, відстеження та оцінки швидкості пішоходів у реальних умовах. Отримані результати можуть бути використані для подальшого вдосконалення систем підтримки прийняття рішень у сфері безпеки, планування евакуацій та

аналізу поведінки натовпу. Залучення реальних даних та врахування кризового контексту підвищує прикладну цінність методики для практичного використання.

Ключові слова: комп'ютерний зір, трекінг об'єктів, оцінка швидкості ходьби, відеоспостереження, глибоке навчання, моніторинг натовпу.

Introduction. In the modern world, there are a lot of places of crowd congregations, especially in big cities. Understanding crowd movements may help to improve environments and make them more ergonomic and efficient for usage in daily life, and, what's more important, during emergencies.

To be able to analyze crowd movements, we need to formalize them and store data in some way. Crowd monitoring and tracking techniques, which require advanced methods of computer vision are used for such tasks.

This paper focuses on the data collection and processing of pedestrians' movement based on video from the camera located above the walking area. Collected data is being processed for gait speed estimation and performing analysis of the retrieved information about pedestrians's movement dynamic, which can be used, for example, for crowd modeling in regular and emergency situations. Ukrainian State building regulations [4] define requirements for buildings, including evacuation policies. This research might be beneficial for understanding pedestrians' movements and developing software for crowd modeling.

Problem statement. The paper proposes a process for data collection about crowd dynamics and aims to process and analyze collected data.

To achieve the goal, several key steps must be undertaken. First, a thorough review of existing literature on crowd dynamics analysis will provide a foundation for understanding current methodologies and identifying gaps. Based on this review, an appropriate method and software will be selected for detecting, tracking, and estimating the speed of pedestrians. Following this, relevant data will be collected in the form of video recordings from real-world scenarios, which will then undergo processing to extract numerical information necessary for analysis.

The processed data will be analyzed to derive meaningful insights into pedestrian movement. This analysis will include determining the number of pedestrians at each moment in time and examining how their average speed changes over time. Additionally, speed-time graphs will be generated to compare the behavior of pedestrians moving in groups with those moving individually. The analysis will also focus on understanding the distribution of speeds and identifying the minimum, maximum, and average speeds observed throughout the dataset.

Related papers. Computer vision techniques are the subject of multiple research papers and already became a part of commonly used software products that help in daily tasks. Advanced techniques like neural network models are utilized to implement intelligent systems that perform complex operations.

Kannadasan and Yogeswari [2] consider the problem of estimating the volume of vehicles on the road in real time. Authors utilize the YOLO-v5 model to detect and categorize detected objects. Authors improved the model to increase the performance of the object counting task to make it possible to perform operation in real time. It is beneficial for understanding flow density and density dynamics. However, we're interested also in the pedestrians' speed estimation which is not covered in this paper.

Shrivastav et al. [11] are solving a similar problem to Kannadasan and Yogeswari. They are counting pedestrians using the YOLO-v4 model. Authors also proposed a direction estimate method based on the pedestrians' trajectories, which provides information for understanding crowd dynamics.

M. W. Park et al. [9] performed an experiment in which 24 volunteers performed a video-recorded 10-m gait test. Authors estimated the gait speed using their method based on pose estimation. The author's aim is to determine the minimum distance between a pedestrian and smartphone camera. However, the actual speed estimation in the experiment is performed partially manually since the distance is calculated based on the markers on the video.

S. Mirzaei [12] addresses the challenge of monitoring intersections using a dual-camera system for enhanced detection, tracking, and predictive safety alerts for road users. The authors employ deep learning-based object detection and multi-object tracking to analyze vehicle and pedestrian movement. Their approach integrates predictive modeling to issue real-time safety alerts, improving intersection safety. Their system relies on a dual-camera setup and converts data from video sources to the GPS coordinates, which allows them to calculate the speed. However, their system relies on a dual-camera setup, while our study focuses on single-camera pedestrian speed estimation, which presents unique challenges in distance and motion analysis.

Recent advancements in pedestrian speed estimation have explored diverse sensing technologies, including Radar, LiDAR, and magnetometers. A. Boroomand et al. [1] leverages Frequency-Modulated Continuous Wave (FMCW) Radar to autonomously estimate gait speed by analyzing Doppler shifts in reflected signals, demonstrating its effectiveness in non-contact motion tracking. X. Peng and J. Shan [13] utilize Doppler LiDAR to

accurately detect and track pedestrian motion, using laser-based velocity estimation to enhance tracking precision in urban environments. Meanwhile, Y. Liu [14] introduces a novel approach for indoor pedestrian speed estimation, combining magnetometer-based motion detection with odometry techniques to improve accuracy in GPS-denied environments. These studies highlight the growing use of multi-sensor technologies for precise and adaptable pedestrian speed estimation, with applications ranging from urban mobility and surveillance to healthcare and indoor navigation. However, these researches propose approaches that require more specific equipment for their implementation, which makes them less usable.

There are studies that use a similar approach as we do – videographic technique to estimate gait speed. Ali et al. [6] are estimating pedestrians' speed using recordings from a camera. They are using a software for detecting and storing coordinates of pedestrians, as we do. However, the camera is placed vertically at the ceiling of the shopping mall atrium, which is not a usual position of the camera. It also limits usage of the approach to a very specific use case. The camera position allows us to perform trivial calculations knowing pedestrians' coordinates on the image.

Ghomashchi et al. [5] used YOLO-v4 model for pedestrians detection and tracking from the bird's-eye-view video images. For speed estimation, a manual, to a great extent, method was used, based on a ray casting technique. Authors manually defined a polygon, which represented a crosswalk and calculated the time the pedestrian spent inside the defined polygon. Knowing the real length for the crosswalk and time, the speed was calculated. Authors utilize a similar technique for pedestrians' detection and tracking, but the method for speed estimation is more primitive and not usable in a random use case since it requires manual operations to be done.

The reviewed studies do not provide data on pedestrian movement dynamics in real-world scenarios with extended observation periods. Our research aims to address this gap.

Pedestrian speed estimation method. This section covers the steps of retrieving data for analyzing crowd dynamics, technical details of the proposed implementation, and briefly describes the method of pedestrian speed estimation along with the necessary prerequisites for its correct execution.

Our objective is to extract data enabling the construction of speed-time graphs, the derivation of speed distributions, and the identification of pedestrians moving individually or within groups. The methodology employed in this study was comprehensively detailed in our previous work [10]. Here, we provide a concise overview of the key concepts and introduce extensions to the approach.

The initial step of the proposed method involves the identification and tracking of pedestrians, achieved through the utilization of the YOLOv7 object detection model by Wang et al. [3]. The result of the object detection and tracking is the data about the coordinates of every detected object on every frame, stored in the relational database.

The next step is the speed estimation based on the stored data. Fig. 1 displays central projection from the camera point of the image plane on the real-world plane. Here:

$A_0B_0C_0D_0$ – image plane of the camera;

$\overline{BD}$ – movement vector. We can calculate the size of this vector in pixels;

$A_{0p}B_{0p}C_{0p}D_{0p}$ – area on the real-world plane visible on the image from the camera;

$\overline{B_pD_p}$ – vector on the real-world plane we are aiming to estimate.

The method presented in [10] enables the calculation of $\overline{B_pD_p}$, which is a diagonal of the trapeze $A_pB_pC_pD_p$.

$$\overline{B_pD_p} = \sqrt{h^2 + \left(A_pB_p + h \cdot \text{ctg}(\angle A_pD_pC_p) \right)^2}, \quad (1)$$

where h – the height of the trapeze.

The equations required for calculating all parameters in (1) are provided in [10]. They are not reproduced here to avoid redundancy and maintain focus on the primary objectives of this study.

The required parameters for calculation are:

- Height of the camera position;
- The tilt angle of the camera;
- The focal length of the camera in millimeters;
- Camera resolution;
- Sensor size;
- Vertical viewing angle of the camera.

Additionally, a post-processing step is applied to the data to identify pedestrians within groups. The pedestrian is marked as one moving within a group if he intersects another pedestrian in 50% of all frames where he was detected.

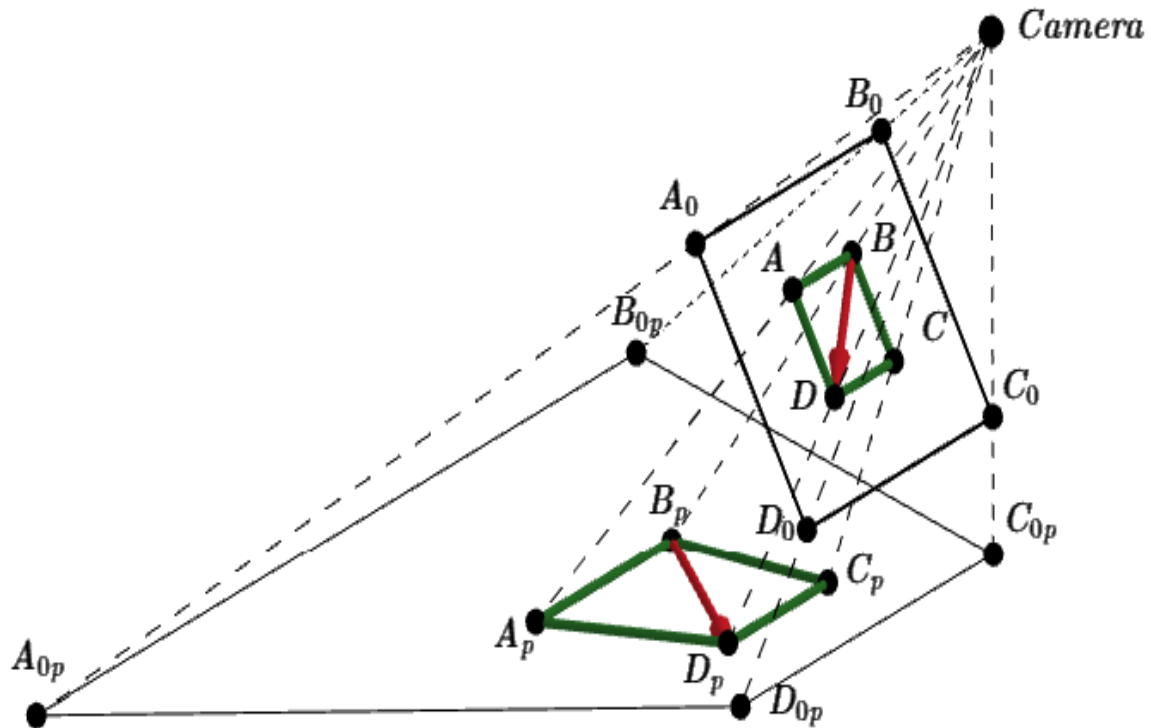


Fig. 1. Projection from image plane to a real-world plane

Data processing and analysis. As the video for processing a video from the camera positioned in the school hole was selected. The video was recorded during a working day in the Ukrainian school. The total duration of the video is 6,5 hours, starting at 8:12 AM till 2:43 PM. It is worth mentioning that the recording was made in November 2024, during the war in Ukraine. Almost every day, there are multiple air raid alerts, which force students and personnel to move to the shelter. During the period of recording, there were two air raid alerts: from 1:35 AM to 8:36 AM and from 1:49 PM to 2:21 PM. These periods will be displayed on the graphs as two highlighted regions.

Pedestrians flow. First, we will consider a graph of number of detected objects over time – Fig. 2.

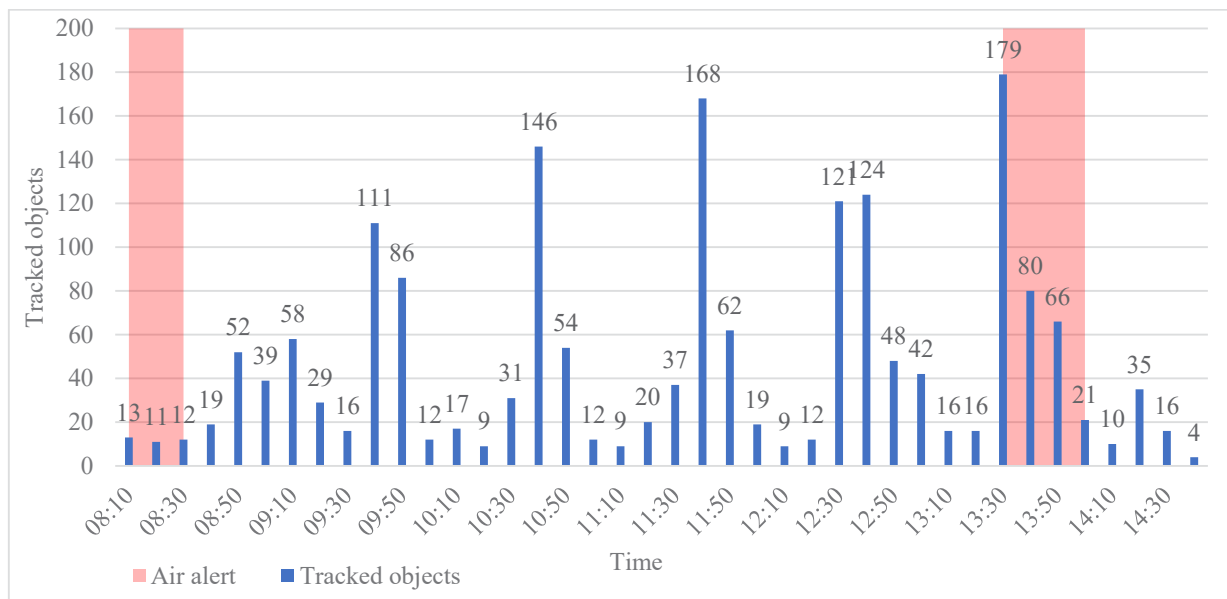


Fig. 2. Detected objects over time

The proposed detection method identifies objects in each frame and is capable of tracking them across consecutive frames. However, there are instances when an object becomes temporarily occluded for several frames – for example, when it is obscured by other objects. In such cases, the same pedestrian might be treated as multiple tracking objects, potentially inflating the values shown in Fig. 1. Nevertheless, this approach enables visualization of pedestrian dynamics and allows for comparative analysis of pedestrian flow over time. Importantly, this issue does not significantly affect the calculations of the average estimated speed, which will be discussed in subsequent sections.

In Fig. 2, distinct spikes are observed every hour at approximately 40 minutes. This can be attributed to 15-minute breaks between lessons. The lowest pedestrian flow values are recorded at the beginning of each hour, corresponding to the start of lessons. The first air raid alert occurred prior to the beginning of the video recording, resulting in minimal movement until the alert ended. During the second air raid alert, pedestrian movement towards the shelter is evident, indicating the highest number of detected objects overall period of observation, with movement decreasing to its lowest value at 14:10.

Average speed. The graph in Fig. 3 contains average pedestrian speed data during observed time, and the graph on Fig. 4 displays the average speed distribution.

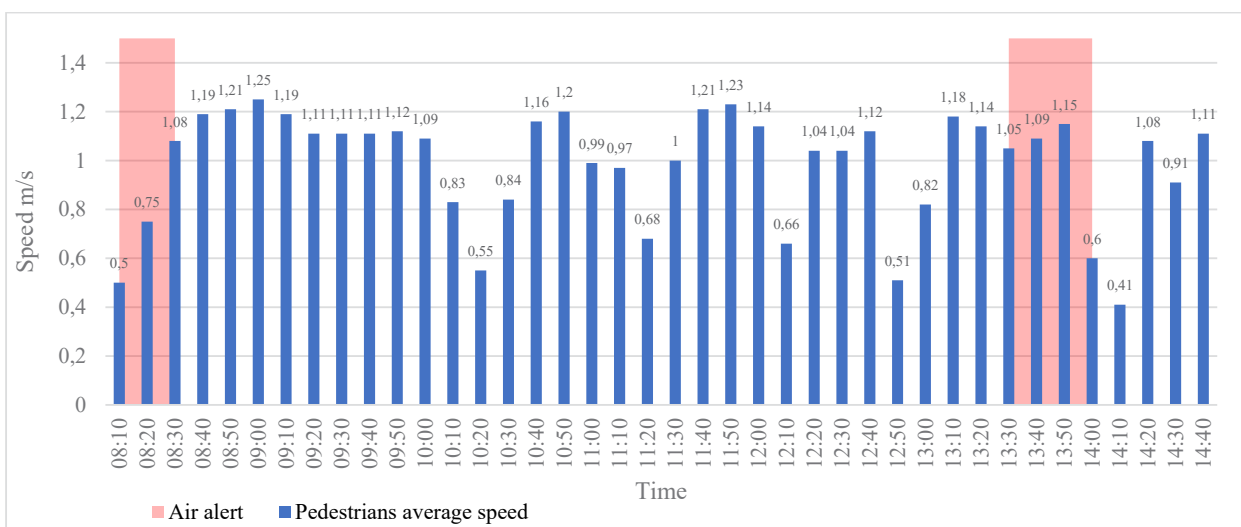


Fig. 3. Average speed over time

The graph illustrates the average median speed of pedestrians, calculated over 10-minute intervals. This approach was chosen based on the characteristics of the algorithm employed, which estimates the distance between the tracked objects' positions across consecutive frames. In certain instances, portions of a pedestrian's body may be obscured from the camera view by other pedestrians or objects. This occlusion can result in abrupt shifts ("jumps") in the detected pedestrian position as the detection algorithm continues to identify and track the individual. Considering that pedestrian movement is generally uniform and accounting for these detection nuances, the median speed per pedestrian was used as a more robust measure. Subsequently, the average speed was calculated based on these median values to generate the presented graph.

As observed, there are several periods where the average speed approaches its maximum value of 1.25 m/s. The highest speeds are recorded during breaks between lessons and at the onset of air raid alerts. In contrast, the lowest speeds are observed during lesson times. This reduction in speed during lessons can be explained by two factors: a smaller number of detected pedestrians and a cabinet within the video frame where individuals remain stationary for extended periods. These factors contribute to noticeable drops in the average moving speed.

The average detected speed is 1.15 m/s, which agreed with the research of M. Giannoulaki and Z. Christoforou [7], where authors gathered different previous researches on pedestrian speed and claim that pedestrians' speed varies from 0.78 to 2.79 m/s depending on conditions, with an average value of 1.26 m/s.

The correlation coefficient between the average speed and the number of pedestrians is 0.36, which is a weak to moderate value. In the social sciences, where human behavior is researched, such a value is considered sufficient. So, in our experiment, the higher the number of pedestrians, the higher their average speed, which might be counterintuitive. However, in our case, there was no crowding, and people moved freely. In the case of bottlenecks, moving speed would obviously decrease significantly with the rising size of the crowd.

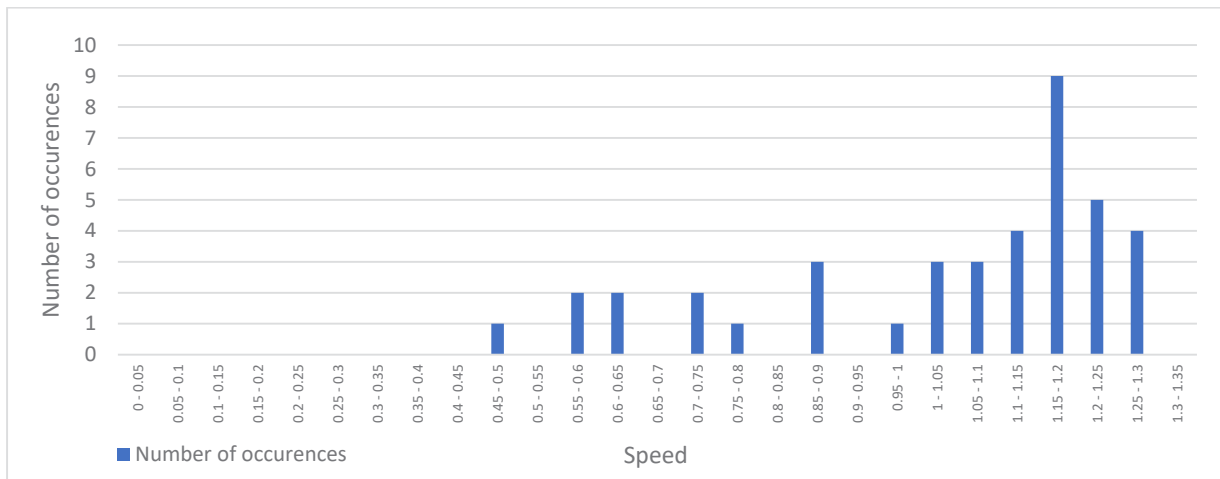


Fig. 4. Speed distribution

Groups and single pedestrian dynamics. In this section, we will consider the dynamic of pedestrians walking within a group and single pedestrians. Fig. 5 displays the average speed of single pedestrians and within a group along with a number of such founded objects for 10-minute intervals. A pedestrian is considered as one walking within a group if its frame intersects someone else's frame at least in 50% of frames the pedestrian has been detected.



Fig. 5. Groups and single pedestrians dynamics

This chart confirms the previous conclusion about the positive correlation between a number of detected objects and their speed. In most cases, people in groups move faster than single pedestrians.

To formalize dependency, we will calculate the Effect size coefficient – η^2 , indicating the impact of the independent variable, in our case, the type of movement – single pedestrian or the pedestrian within a group, on the dependent variable, average speed.

The results are next: $\eta^2_{group} = 3.53\%$, $\eta^2_{single} = 4.25\%$. Both values indicate a small effect size of the moving type on the average speed.

Conclusions. This study made it possible to evaluate the proposed method for estimating pedestrian gait speed [10] under real-world conditions by visualizing the obtained data after processing and generating statistical summaries. A 6.5-hour video recording was captured in a school corridor and analyzed using an artificial neural network (ANN)-based model for object detection and tracking, along with the developed approach for

movement speed estimation. The analysis facilitated a comprehensive statistical examination of pedestrian dynamics, including pedestrian flow, temporal variations in average speed, speed distribution, and the influence of walking alone versus in a group on movement speed.

A total of 1,841 pedestrian trajectories were detected, with an average walking speed of 1.15 m/s. The obtained data clearly demonstrate a correlation between the number of pedestrians and their walking speed with the presence of breaks between classes, which confirms the validity of the proposed method. While walking in a group versus alone did not exhibit a statistically significant effect on movement speed, a slight influence of this factor was still observed.

Next steps. The implemented method enables the processing of recorded video footage. The speed estimation algorithm is analytical, relying on mathematical operations that are computationally efficient, allowing for real-time execution. However, the primary limitation of the current implementation lies in the detection and tracking stage, which operates relatively slowly and is not suitable for real-time applications.

Overall, the current implementation [8] is effective for extracting data for subsequent analysis. Further optimization is required to achieve real-time processing capabilities. Once real-time operation is achieved, the approach can be effectively utilized for recognizing critical situations and as a component of video analytics in decision support systems for emergency scenarios.

Bibliography:

1. A. Boroomand, G. Shaker, P. P. Morita, A. Wong and J. Boger, "Autonomous gait speed estimation using 24GHz FMCW radar technology," 2018 IEEE EMBS International Conference on Biomedical & Health Informatics (BHI), Las Vegas, NV, USA, Apr 2018, pp. 66–69. <https://doi.org/10.1109/BHI.2018.8333371>.
2. B. Kannadasan and K. Yogeswari, "ANN-based traffic planning model using adaptive YOLOv5-aided object counting from surveillance videos". *Asian Journal of Civil Engineering*, vol. 25, pp. 4771–4788, May 2024. <https://doi.org/10.1007/s42107-024-01079-9>.
3. B. Y. Wang, A. Bochkovskiy, H. Y. M. Liao. "YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors," In CVPR, New Orleans, LA, USA, 2022, pp. 7464–7475. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.02696>.
4. DBN V.1.1-7:2016, Fire Safety of Building Structures, Ministry of Regional Development of Ukraine, Kyiv, 2016. URL: https://e-construction.gov.ua/files/new_doc/3019922918881626107/2023-01-20/5c73ab5e-fc7d-4433-8bcf-6f78978113b6.pdf.
5. H. Ghomashchi, J. Paterson, A. C. Novak, and T. Dutta, "Estimating pedestrian walking speed at street crossings using the YOLOv4 and deep SORT algorithms: Proof of principle," *Applied Ergonomics*, vol. 119, Article 104292, Apr. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2024.104292>.
6. M. F. M. Ali, M. S. Abustan, et al., "A Case Study of Malaysian Pedestrian Walking Speed at Shopping Malls in Kuala Lumpur, Malaysia using Human Behaviour Simulator (HBS)," *International Journal of Integrated Engineering*, vol. 11, no. 4, pp. 225–230, Aug. 2019. <https://doi.org/10.30880/ijie.2019.11.04.025>.
7. M. Giannoulaki, Z. Christoforou, "Pedestrian Walking Speed Analysis: A Systematic Review," *Sustainability*, vol. 16, no. 11, Article 4813, Jun. 2024. URL: <https://translate.google.com/website?sl=en&tl=uk&hl=uk&prev=search&u=https://doi.org/10.3390/su16114813>.
8. M. Tishkov. Pedestrian speed estimation. 2024. URL: https://github.com/MaksymTishkov/pedestrian_speed_estimation.
9. M. W. Park, S. G. Chung, J. Beom, K. S. Kim, J. Kim, and C. H. Park, "Minimum Required Distance for Clinically Significant Measurement of Habitual Gait Speed," *Research Square*, 2024. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5403357/v1>.
10. O. L. Tymoshchuk, M. O. Tishkov, V. G. Bondarenko, "Crowd navigation monitoring during emergencies," *System research and information technologies*, no. 4, pp. 43–54, Dec. 2024. <https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2024.4.03>.
11. P. Shrivastav and A. K. T. Andu, "Integrated Approach for Real-time Human Counting, Tracking, and Direction Estimation using Advanced Algorithms," 2024 15th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT), Kamand, India, Nov. 2024, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICCCNT61001.2024.10726257>.
12. S. Mirzaei, "Dual-Camera Intersection Monitoring: Detection, Tracking, and Predictive Safety Alerts for Road Users," M.A.Sc. thesis, Dept. of Mechanical Eng., McMaster Univ., 2024. <http://hdl.handle.net/11375/30193>.
13. X. Peng and J. Shan, "Detection and tracking of pedestrians using Doppler LiDAR," *Remote Sensing*, vol. 13, no. 15, Article 2952, Jul. 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13152952>.
14. Y. Liu, W. Zhang, L. Cao and D. Wei, "Ped-Mag-ODO: Indoor Pedestrian Motion Speed Estimation Method Based on Dual Magnetometers," *IEEE Internet of Things Journal*, Dec. 2024. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3512504>.

УДК 004.75

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.35>

Тетяна ЧІЛІКІНА

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Полтавський університет економіки і торгівлі, tv.0502@ukr.net

ORCID: 0000-0001-8234-9131

Ганна КАРНАУХОВА

старший викладач кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Полтавський університет економіки і торгівлі, karnaukhovahv@gmail.com

ORCID: 0000-0001-8089-8743

Оксана ОРИХІВСЬКА

старший викладач кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Полтавський університет економіки і торгівлі, aka.jeita@gmail.com

ORCID: 0000-0003-2775-0832

Яна ЗАГОРУЙКО

здобувач спеціальності «Комп'ютерні науки», Полтавський університет економіки і торгівлі, yana.zahoruiko@gmail.com

ORCID: 0009-0001-3470-532X

РОЗРОБКА САЙТУ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ СВОЇМ РОЗКЛАДОМ ТА ЗАВДАННЯМИ

Анотація. У сучасному динамічному світі ефективне управління часом є критично важливим, однак наявні цифрові планувальники часто не відповідають потребам користувачів через складність або обмежений функціонал.

Мета роботи – створення вебзастосунку, який поєднує інтуїтивний інтерфейс, ефективне управління цілями та завданнями й адаптацію під індивідуальні потреби користувача.

Методологія. Аналітичний підхід до вивчення користувацьких потреб і моделей поведінки, методи UX/UI-дизайну, застосування сучасних фреймворків і мов програмування (TypeScript, React, Next.js, NestJS), а також використання принципів адаптивної верстки, клієнт-серверної архітектури та баз даних MongoDB.

Наукова новизна полягає в структурованій інтеграції згаданих підходів у функціонал одного вебзастосунку: обмеження користувача до 5 активних цілей, що забезпечує фокусування; можливість аналізу досягнень через розділ статистики; адаптивність інтерфейсу з підтримкою української та англійської мов. Вебзастосунок реалізовано на основі модульної архітектури з чітким розподілом відповідальностей між модулями (auth, user, tasks, goals, statistics). Клієнтська частина побудована за принципами features based архітектури, що підвищує масштабованість проекту.

Розроблено інструмент, який може бути використаний широким колом користувачів – студентами, фахівцями, фрилансерами, творчими людьми – для ефективного управління особистим часом і досягнення стратегічних життєвих або професійних цілей.

Висновки. Запропонований у цій роботі цифровий планувальник має низку ключових переваг, а саме: цільова спрямованість, гнучке планування, мінімалістичний інтерфейс, аналітика прогресу, адаптивність.

Ключові слова: веб-планувальник, програма-асистент, управління часом, JavaScript.

Tetyana CHILIKINA, Hanna KHARNAUKHOVA, Oksana ORIKHIVSKA, Yana ZAHORUIKO. WEBSITE DEVELOPMENT FOR MANAGING YOUR SCHEDULE AND TASKS

Abstract. In today's dynamic world, effective time management is critically important, but existing digital planners often do not meet user needs due to complexity or limited functionality.

The purpose of the work is to create a web application that combines an intuitive interface, effective management of goals and tasks, and adaptation to the individual needs of the user.

Methodology. Analytical approach to studying user needs and behavior patterns, UX/UI design methods, application of modern frameworks and programming languages (TypeScript, React, Next.js, NestJS), as well as use of principles of adaptive layout, client-server architecture and MongoDB databases.

The scientific novelty lies in the structured integration of the aforementioned approaches into the functionality of one web application: limiting the user to 5 active goals, which ensures focus; the ability to analyze achievements through the statistics section; adaptability of the interface with support for Ukrainian and English languages. The web application is implemented based on a modular architecture with a clear division of responsibilities between modules (auth, user, tasks, goals, statistics). The client part is built according to the principles of features based architecture, which increases the scalability of the project.

A tool has been developed that can be used by a wide range of users – students, professionals, freelancers, creative people – to effectively manage personal time and achieve strategic life or professional goals.

Conclusions. The digital planner proposed in this work has a number of key advantages, namely: goal-oriented, flexible planning, minimalist interface, progress analytics, and adaptability.

Key words: web planner, assistant program, time management, JavaScript.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими чи практичними завданнями. У сучасному світі, де темп життя постійно зростає, а кількість повсякденних завдань невіддільно збільшується, багато людей стикаються з труднощами ефективного розподілу часу. Нестача чіткої структури дня, надлишок інформаційних подразників і нечітко сформульовані цілі призводять до зниження концентрації, зростання рівня стресу та відчуття розгубленості в потоці справ.

Попри наявність великої кількості цифрових планувальників, багато з них або надто примітивні та не забезпечують системності, або ж мають надмірно складний функціонал, що відволікає від головного. Це створює потребу в інструменті, який допомагає зосередитися на важливому, зберігаючи простоту й логічність інтерфейсу.

Зростання попиту на прості та візуально привабливі планувальники, орієнтовані на досягнення цілей, підтверджує актуальність цієї розробки. Вона поєднує в собі зручність користування з чіткою структурою, що допомагає не лише планувати день, а й рухатися до довгострокових стратегічних результатів. Таким чином, створення подібного цифрового інструменту є своєчасною та практичною відповіддю на запити сучасного користувача.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В [1] представлено веб-додаток для організації завдань, що включає функції створення, категоризації, пріоритезації, планування та відстеження прогресу. Дослідження оптимізації розкладу завдань у мобільних хмарних обчисленнях для IoT-додатків, що може бути корисним для розробки систем управління завданнями, представлено в роботі [10]. Стаття [12] аналізує методи планування розкладу програмних проєктів, включаючи використання мережевих діаграм для візуалізації залежностей між завданнями. Серед найбільш популярних платформ для управління завданнями та організації часу варто виокремити Trello [3] та Todoist [4]. Обидва інструменти демонструють високий рівень ефективності, але орієнтовані на різні типи користувачів і стилі роботи. Todoist краще підходить для користувачів, які шукають простоту, швидкість і мінімалістичний дизайн для особистого планування. Натомість Trello забезпечує більше можливостей для візуалізації та командної взаємодії, що є важливим при реалізації багатоступеневих проєктів.

Постановка завдання. Для розробки власного цифрового планувальника доцільно враховувати найкращі практики цих сервісів, зокрема: інтуїтивність інтерфейсу, гнучкість налаштувань, можливість аналітики. Це дозволить створити конкурентоспроможний продукт, що відповідає сучасним очікуванням користувачів [9].

Виклад основного матеріалу дослідження. Основним матеріалом для розробки планувальника стали концепції з таких галузей знань:

Теорія goal-setting theory: дослідження Едвіна Локка та Гаррі Латема доводять, що постановка конкретних, обмежених за кількістю і складністю цілей підвищує продуктивність та мотивацію. У планувальнику цю ідею реалізовано через ліміт у 5 активних цілей, що дозволяє уникнути розфокусу та зберегти чіткість у плануванні [6].

Методи тайм-менеджменту: теорії Девіда Аллена (метод GTD), техніка Pomodoro Франческо Чірілло, принцип Парето (80/20), вказують на необхідність структурування задач і фокусування на пріоритетних діях [2]. У розробленому додатку завдання структуруються навколо цілей, які формують фокус користувача на найважливішому.

UX/UI-дизайн: сучасні принципи дизайну (керованість, контрастність, доступність) вимагають адаптації інтерфейсів до потреб користувачів, включаючи темну та світлу тему, а також багатомовність [7]. У планувальнику реалізовано підтримку української та англійської мов, що розширює аудиторію проєкту.

Візуальна аналітика: з точки зору користувацької мотивації важливо мати змогу відстежувати власні досягнення. Тому в планувальнику реалізовано щомісячну та річну статистику, де видно кількість виконаних завдань у розрізі кожної цілі. Це сприяє як самоаналізу, так і покращенню особистої ефективності [5].

Отже, у межах теоретичного дослідження було враховано сучасні підходи до планування, психології продуктивності, користувацького досвіду та аналізу даних. Це дозволило сформувати основу для створення цифрового планувальника, який поєднує простоту, функціональність і гнучкість.

Опис структури сайту.

Сайт-планувальник побудований за принципами мінімалізму, фокусуючись на продуктивності та зручності користувача. Його структура складається з таких основних розділів:

1. Головна сторінка сайту.

- Коротка інформація про проєкт.
- Кнопка для авторизації користувача.
- Контактна інформація та посилання на соцмережі або додаткові ресурси.

2. Сторінка авторизації.

- Можливість входу за допомогою електронної пошти або Google-акаунту.
- Форма реєстрації нового користувача.

3. Головна сторінка планувальника.

- Можливість створення до 5 активних цілей.
- Додавання необмеженої кількості завдань до кожної цілі.
- Відображення поточних завдань та короткої тижневої статистики виконання.

4. Тижневе планування.

- Інтерфейс для планування завдань на поточний тиждень.
- Можливість перетягування завдань між днями тижня (drag-and-drop).
- Кожне завдання пов'язане з конкретною ціллю, що дозволяє зберігати фокус.

5. Статистика.

- Доступна щомісячна та річна статистика.
- Виводиться кількість виконаних завдань у розрізі цілей.
- Можна простежити активність користувача, продуктивні дні та прогрес.

6. Налаштування.

- Зміна мови інтерфейсу (українська / англійська).
- Перемикання між темною і світлою темами.
- Оновлення електронної пошти, паролю, аватару користувача.

На UML-діаграмі класів змодельовано взаємозв'язки між користувачем, цілями, завданнями та статистикою у планувальнику завдань (рис. 1).

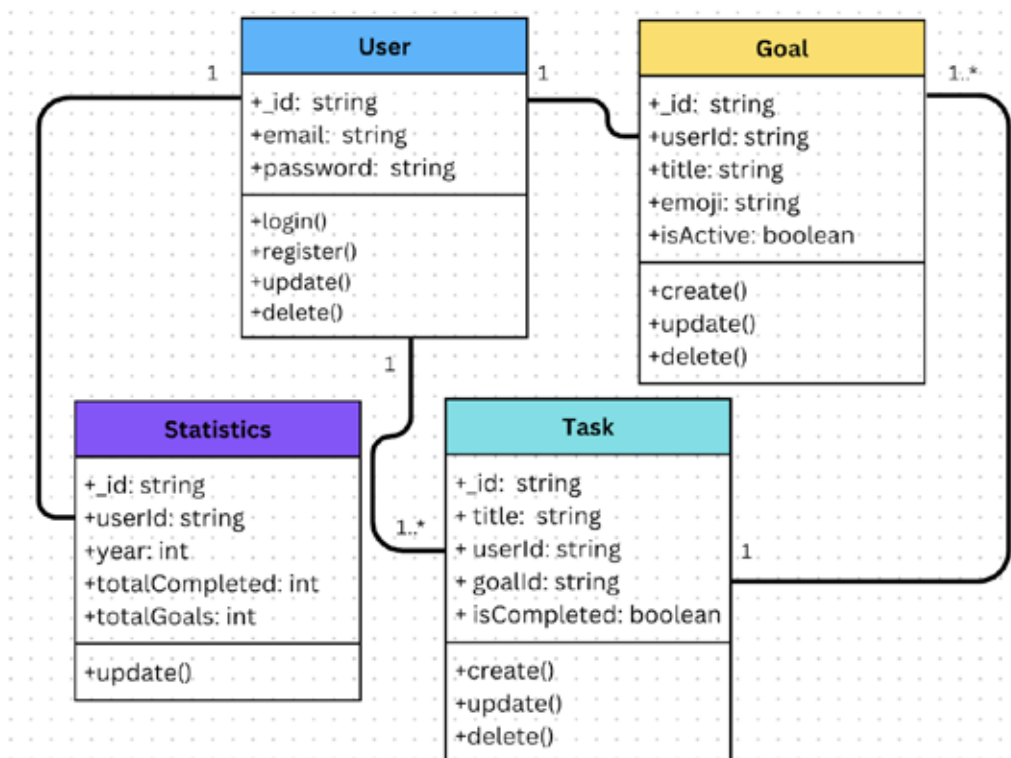


Рис. 1. UML-діаграма класів планувальника

- Зв'язок між User та Goal Тип зв'язку: 1 → 0*. Один користувач може створювати багато цілей. Кожна ціль належить лише одному користувачу. Таким чином, між сутностями User і Goal реалізовано зв'язок типу "один до багатьох".

- Зв'язок між User та Task Тип зв'язку: 1 → 0*. Один користувач може мати багато завдань. Кожне завдання належить одному користувачу. Це відображає зв'язок "один до багатьох" між користувачем та його завданнями.

- Зв'язок між User та Statistics Тип зв'язку: $1 \rightarrow 0$.* Один користувач може мати декілька записів статистики – за різні роки або періоди відстеження. Таким чином, між User і Statistics існує зв'язок типу "один до багатьох".

- Зв'язок між Goal та Task Тип зв'язку: $1 \rightarrow 0$.* Кожна ціль може включати багато завдань, які сприяють її досягненню. Завдання належить одній конкретній цілі. Це зв'язок "один до багатьох" між Goal і Task.

Проект організовано за модульним принципом. Виділено основні модулі: auth, user, tasks, statistics, goals, date.

Кожен модуль містить три основні частини:

- Controller – відповідає за обробку HTTP-запитів (GET, POST, PUT, DELETE) та викликає відповідні методи сервісу.

- Service – містить основну бізнес-логіку модуля (створення, оновлення, валідація, зв'язки з базою даних).

- Module – слугує як конфігураційний елемент, який реєструє контролери та сервіси модуля та забезпечує їхню взаємодію.

1. Модуль авторизації auth.

Модуль авторизації відповідає за:

- реєстрацію нового користувача,
- вхід у систему (login) з перевіркою облікових даних,
- оновлення та валідацію токенів доступу (JWT),
- інтеграцію з Google OAuth.

Модуль включає:

- Auth Controller – приймає запити від клієнта (/register, /login, /refresh-token, тощо),
- Auth Service – обробляє логіку перевірки користувача, генерації токенів, хешування паролів,
- Auth Module – підключає залежності, реєструє потрібні провайдери та імпортує інші модулі (наприклад, UserModule для доступу до користувачів).

2. Модуль користувача user.

Модуль користувача відповідає за:

- отримання інформації про користувача,
- оновлення особистих даних (ім'я, email, аватар, тощо),
- видалення облікового запису.

Модуль включає:

- User Controller – приймає запити від клієнта,
- User Service – обробляє логіку додавання та зміни даних користувача,
- User Module – підключає залежності.

3. Модуль створення та редагування завдань tasks.

Модуль відповідає за створення, оновлення, видалення завдань.

Модуль включає:

- Tasks Controller – приймає запити від клієнта для додавання, оновлення завдань,
- Tasks Service – обробляє логіку додавання та зміни даних завдань,
- Tasks Module – підключає залежності.

4. Модуль створення та редагування цілей goals.

Модуль відповідає за отримання, створення, оновлення, видалення цілей.

Модуль включає:

- Goals Controller – приймає запити від клієнта для отримання, додавання, оновлення цілей,
- Goals Service – обробляє логіку отримання цілей, додавання та зміни цілей,
- Goals Module – підключає залежності.

5. Модуль статистики statistics.

Модуль відповідає за отримання, створення статистики.

Модуль включає:

- Statistics Controller – приймає запити від клієнта для отримання статистики,
- Statistics Service – обробляє логіку отримання, розрахунку та оновлення статистики,
- Statistics Module – підключає залежності.

6. Модуль статистики date.

Модуль відповідає за отримання даних про поточний або минулий тиждень.

Модуль включає:

- Statistics Service – приймає запити від інших модулів про необхідні дати,
- Statistics Module – підключає залежності.

До загальних принципів можна віднести наступні:

- Кожен модуль ізольований, відповідає за одну область відповідальності (SRP).
- Взаємодія між модулями відбувається через сервіси, які експортуються через `@Module({ exports: [...] })`.
- Дані зберігаються в MongoDB [11], моделі створюються за допомогою Typegoose схем.
- Усі змінні оточення зберігаються у файлі `env`.

Також для забезпечення стабільності, безпеки й зрозумілості API в проєкті реалізовані додаткові технічні шари: DTO, валідація та guard-и.

Реалізація клієнтської частини.

Проектна структура реалізована за принципами features based архітектури з акцентом на модульність, повторне використання компонентів та простоту масштабування. Features based підхід передбачає розділення логіки за функціональними частинами застосунку, де кожна фіча організована у вигляді окремого модуля, що включає всі необхідні елементи для її роботи. Уся логіка проєкту розділена на окремі функціональні блоки, які відповідають модулям бекенду: auth, user, tasks, goals, statistics.

Оскільки проєкт включає авторизацію та використання HTTP токенів, для коректної роботи з авторизованими користувачами створюємо interceptor, який автоматично додає токени до запитів та оновляє їх, а також middleware у Next.js, що працює на серверній стороні фронтенду й перевіряє автентичність користувача через HTTP cookie перед обробкою запитів.

Окрім цього, у проєкті реалізовано багатомовність інтерфейсу через систему перекладів, що дозволяє адаптувати застосунок для користувачів з різних мовних середовищ. Повідомлення про успішні або помилкові дії виводяться через модуль сповіщень, що забезпечує зворотний зв'язок у взаємодії з користувачем. Для уніфікації зовнішнього вигляду застосунку та забезпечення консистентності дизайну створено окремі файли зі стилями, які охоплюють як глобальні налаштування, так і стилі для окремих компонентів.

Розроблений сайт дозволяє користувачеві створювати, переглядати та редагувати свій щоденний розклад із фокусом до 5 цілей. Користувач взаємодіє з інтуїтивним інтерфейсом, у якому всі елементи взаємопов'язані: завдання можна створювати, сортувати, редагувати, перетягувати, позначати як виконані та зв'язувати з довгостроковими цілями (див. рис. 2).

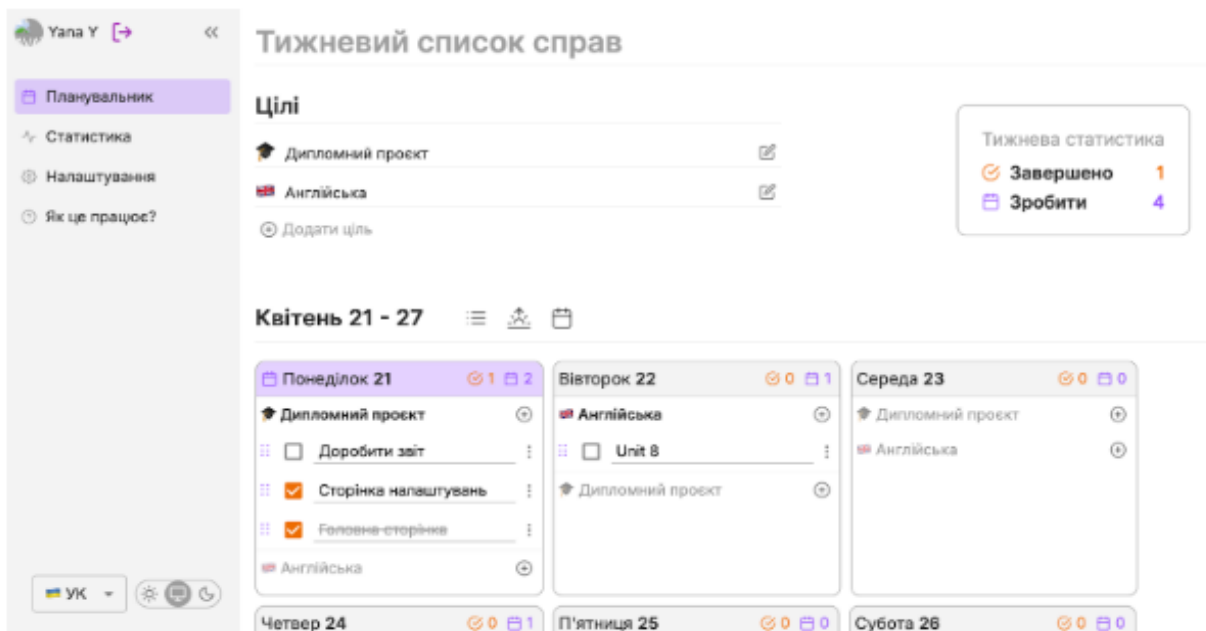


Рис. 2. Головна сторінка планувальника

Висновки з даного дослідження та перспективи подальших розвідок у даному напрямі. Створений вебзастосунок демонструє гнучкість, адаптивність до потреб користувача та можливість інтеграції нових функцій, таких як аналітика звичок, а також підтримка мобільної версії. Це закладає ґрунт для подальшого вдосконалення продукту й масштабування його функціональності для ширшої аудиторії.

Список використаних джерел:

1. Adebayo A., Alawode O. Web-Based Task Organizer for Enhanced Productivity. *ResearchGate*. 2023. URL: https://www.researchgate.net/publication/384666926_Web-Based_Task_Organizer_for_Enhanced_Productivity
2. Allen D. Getting Things Done: The Art of Stress-Free Productivity. Penguin Books. Publisher: Penguin Books. 2002. 288 p
3. Atlassian компанія. Trello – візуальний інструмент для управління завданнями та проектами. URL: <https://trello.com>.
4. Doist компанія. Todoist – це популярний додаток для управління завданнями. URL: <https://todoist.com>.
5. Few S. Information Dashboard Design: The Effective Visual Communication of Data. O'Reilly Media. Publisher: O'Reilly. 2006. 224 p
6. Locke E. A., Latham G. P. Building a practically useful theory of goal setting and task motivation: A 35-year odyssey. *American Psychologist*, 2002. 57(9), 705–717. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.57.9.705>
7. Norman D. A. The Design of Everyday Things. MIT Press. Publisher: The MIT Press. 2013. 268 p.
8. Ольховська О. В., Кошова О. П., Черненко О. О., Тур В. М. РОЗРОБКА МОБІЛЬНОГО АВТОМАТИЗОВАНОГО АГРЕГАТОРА ВАКАНСІЙ В ІТ-ГАЛУЗІ. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*, 2024. (6), 72–80. <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2024.6.8>
9. Peter A. Heslin, Jay B. Carson, Don Vandewalle Practical Applications of Goal Setting Theory to Performance Management URL: https://www.researchgate.net/publication/228211042_Practical_Applications_of_Goal_Setting_Theory_to_Performance_Management (дата звернення: 30.01.2025).
10. Ramalingam V., Dhavachelvan P., Sundararajan E. An Efficient Dynamic Decision-Based Task Optimization and Scheduling in Mobile Cloud Computing for IoT Applications. *Procedia Computer Science*, 2023. 222, 134–140. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.023>
11. Ranjeet Jha, MongoDB Essentials: Build Faster, Perform Better, Store Smarter, Scale Bigger, and Master Document Database, 2025, 380 p.
12. Zhao J. Research on Software Project Schedule Planning Technology. *Procedia Computer Science*, 2023. 222, 225–232. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.030>

УДК 004.056.5

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.36>

Людмила ШПОРТ

викладачка, Київський фаховий коледж зв'язку комісії кібербезпеки, електронних комунікацій та економіко-управлінської підготовки,
магістрантка факультету інформаційних технологій
спеціальності 125 – Кібербезпека та захист інформації, Державний торговельно-економічний університет, email: luda.kaziuchits@gmail.com
ORCID: 0009-0006-3114-4965

**ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ МІЖБАНКІВСЬКИХ ПЛАТЕЖІВ,
КОМПЛЕКСНА КРИПТОГРАФІЧНА АРХІТЕКТУРА**

Анотація. У статті авторкою розглядається проблема забезпечення безпеки електронних міжбанківських платежів в умовах зростаючих кіберзагроз. Проаналізовано існуючі системи захисту, зокрема SWIFT та SEPA та виявлено їхні обмеження.

Метою даної статті є розробка комплексної криптографічної архітектури, яка здатна значно підвищити рівень безпеки електронних міжбанківських платежів шляхом усунення виявлених вразливостей та врахування сучасних кіберзагроз.

Методологія: використаний потенціал комплексного, системного наукових підходів. Їх сукупність дозволяє здійснити всебічний аналіз технічної та педагогічної літератури, зокрема опрацювання монографічних наукових видань та дисертаційних досліджень, які висвітлюють обрану тему.

Наукова новизна полягає в розробці комплексної криптографічної архітектури, що базується на модулях шифрування, аутентифікації, виявленні вторгнень та аудиту безпеки.

Висновки: в результаті дослідження встановлено, що сучасні міжбанківські платіжні системи, такі як SWIFT та SEPA, використовують комплексний підхід до забезпечення безпеки, що включає організаційні та технічні заходи. SWIFT застосовує асиметричну криптографію, апаратні модулі безпеки та двофакторну аутентифікацію. SEPA використовує стандарти EMV для карткових транзакцій та протоколи TLS/SSL для онлайн-платежів. Визначено, що для ефективного протистояння сучасним кіберзагрозам, необхідна комплексна криптографічна архітектура для міжбанківських платежів, яка відповідатиме суворим вимогам щодо безпеки, продуктивності, масштабованості та сумісності. Запропонована авторська комплексна архітектура безпеки міжбанківських платежів складається з взаємопов'язаних модулів, що забезпечують багаторівневий захист. Проведено моделювання та дано експериментальну оцінку ефективності запропонованої архітектури, що підтвердило її здатність забезпечувати високий рівень безпеки, продуктивності і стійкості до атак.

Ключові слова: криптографічний захист, міжбанківські платежі, кібербезпека, SWIFT, SEPA, комплексна архітектура, шифрування, аутентифікація, виявлення вторгнень, гомоморфне шифрування, блокчейн.

Liudmyla SHPORT. ENHANCING THE SECURITY OF INTERBANK PAYMENTS WITH, A COMPREHENSIVE CRYPTOGRAPHIC ARCHITECTURE

Abstract. In this article, the author discusses the problem of ensuring the security of electronic interbank payments in the context of growing cyber threats. Existing security systems, in particular SWIFT and SEPA, are analyzed and their limitations are identified.

The purpose of this article is to develop a comprehensive cryptographic architecture that can significantly improve the security of electronic interbank payments by eliminating identified vulnerabilities and taking into account modern cyber threats.

Methodology. The potential of integrated, systematic scientific approaches was used. Their combination allows for a comprehensive analysis of technical and pedagogical literature, including the study of monographic scientific publications and dissertation research covering the chosen topic.

The scientific novelty lies in the development of a comprehensive cryptographic architecture based on encryption, authentication, intrusion detection, and security audit modules.

Conclusions. The study found that modern interbank payment systems, such as SWIFT and SEPA, use a comprehensive approach to security, including organizational and technical measures. SWIFT uses asymmetric cryptography, hardware security modules, and two-factor authentication. SEPA uses EMV standards for card transactions and TLS/SSL protocols for online payments. It has been determined that to effectively counter modern cyber threats, a comprehensive cryptographic architecture for interbank payments is needed that meets strict requirements for security, performance, scalability, and interoperability. The author's proposed comprehensive security architecture for interbank payments consists of interconnected modules that provide multi-level protection. The modeling and experimental evaluation of the effectiveness of the proposed architecture was carried out, which confirmed its ability to provide a high level of security, performance and resistance to attacks.

Key words: cryptographic security, interbank payments, cybersecurity, swift, sepa, comprehensive architecture, encryption, authentication, intrusion detection, homomorphic encryption, blockchain.

Постановка питання в загальному вигляді. У сучасному світі глобальної економіки електронні міжбанківські платежі є критично важливою інфраструктурою, що забезпечує безперебійне функціонування фінансових ринків та міжнародної торгівлі. Зростаюча залежність від електронних систем розрахунків, однак, супроводжується експоненційним збільшенням кіберзагроз, націлених на викрадення коштів, порушення діяльності та компрометацію конфіденційної інформації. З огляду на високу вартість наслідків успішних кібератак на міжбанківські системи, забезпечення їхньої безпеки є завданням першочергової важливості [7].

Сучасний стан захисту міжбанківських платіжних систем, таких як SWIFT (Society for Worldwide Interbank Financial Telecommunication) та SEPA (Single Euro Payments Area), ґрунтується на комплексі організаційних та технічних заходів. SWIFT, наприклад, використовує асиметричну криптографію, апаратні модулі безпеки (HSM) та систему двофакторної аутентифікації для захисту своїх мереж. SEPA, у свою чергу, спирається на стандарти EMV (Europay, Mastercard, Visa) для транзакцій з використанням платіжних карток та протоколи TLS/SSL для захисту онлайн-платежів. Проте, незважаючи на існуючі засоби захисту, системи міжбанківських платежів залишаються вразливими до атак, як продемонстрували численні інциденти, включаючи крадіжку коштів через скомпрометовані облікові дані SWIFT.

Проблеми існуючих систем безпеки зумовлені кількома факторами. По-перше, вразливості в програмному забезпеченні та апаратних компонентах, які використовуються в системах міжбанківських платежів, регулярно виявляються, дозволяючи зловмисникам обходити існуючі механізми захисту. По-друге, застарілі криптографічні протоколи та алгоритми, які досі використовуються в багатьох системах, стають вразливими до сучасних обчислювальних атак, особливо з розвитком квантових обчислень. По-третє, недостатня масштабованість існуючих рішень безпеки ускладнює їхнє застосування до швидко зростаючих обсягів транзакцій та нових платіжних каналів. Крім того, внутрішні загрози, пов'язані з людським фактором та недостатньою обізнаністю персоналу про безпеку, також становлять значний ризик.

Метою даної статті є розробка комплексної криптографічної архітектури, яка здатна значно підвищити рівень безпеки електронних міжбанківських платежів шляхом усунення виявлених вразливостей та врахування сучасних кіберзагроз. Архітектура має забезпечити конфіденційність, цілісність та доступність транзакцій, а також забезпечити ефективний захист від зовнішніх та внутрішніх атак.

Методологія. Використаний потенціал комплексного, системного наукових підходів. Їх сукупність дозволяє здійснити всебічний аналіз технічної та педагогічної літератури, зокрема опрацювання монографічних наукових видань та дисертаційних досліджень, які висвітлюють обрану тему.

Наукова новизна. Запропоновано комплексну криптографічну архітектуру, що базується на модулях шифрування, аутентифікації, виявлення вторгнень та аудиту безпеки, а також використовує сучасні криптографічні технології, такі як гомоморфне шифрування та блокчейн. Проведено моделювання та експериментальну оцінку ефективності запропонованої архітектури, що підтвердила її здатність забезпечувати високий рівень безпеки, продуктивності та стійкості до атак.

Аналіз наукових досліджень. Безпека електронних міжбанківських платежів критична в умовах зростаючих кіберзагроз. Наукові дослідження приділяють увагу використанню новітніх технологій, зокрема блокчейн, та адаптації до сучасних викликів. Науковці Підвисоцький Є. та Панченко А. [3] досліджують використання блокчейн для стабілізації банківської системи України [3, с. 152]. Підхонний О.М. та Демид В.М. [4] аналізують фінансові мотиви застосування блокчейн-технологій у банківській справі [4], підкреслюючи зменшення операційних витрат та ризиків. Szabo N. [15] закладає основу розуміння захисту відносин у публічних мережах [15], а Alharby M. та Moorsel A. [9] провели огляд смарт-контрактів на базі блокчейн. Столяренко О.М. та ін. [7] аналізують роль цифрових валют у фінансовій безпеці, а Блинов В. та Череп О. [1] розглядають їх як інструмент міжнародних розрахунків. Arner W. та ін. [11] досліджують ризики та регулювання стейблкоїнів. Nakamoto S. представив концепцію Bitcoin [14], яку досліджували Böhme R. та ін. [12, с. 213–238], Antonopoulos A.M. [10] та Catalini C. i Gans J.S. [13].

В умовах війни, Ситник Н. та Прицак Я. [6] аналізують банківську систему України, як і Черкашин І. [8, с. 87–90], Еркес О. та ін. [2, с. 122–133] та Рушишин Н. та ін. [5, с. 27–36].

Основна частина дослідження. У сфері міжбанківських платежів безпека є пріоритетом, і тому використовуються різноманітні криптографічні рішення для захисту транзакцій та даних. Транспортний рівень безпеки, що реалізується через протоколи TLS та його попередника SSL, відіграє ключову роль у забезпеченні конфіденційності та цілісності даних під час передачі між банківськими системами. IPsec також використовується для створення безпечних VPN-каналів між банками, захищаючи весь мережевий трафік.

Алгоритми шифрування є фундаментальною складовою криптографічного захисту. AES (Advanced Encryption Standard) є широко використовуваним симетричним алгоритмом, відомим своєю високою

швидкістю та стійкістю. RSA, асиметричний алгоритм, застосовується для обміну ключами та цифрового підпису. ECC (Elliptic Curve Cryptography) стає все більш популярним завдяки своїй ефективності та меншому розміру ключа при однаковому рівні безпеки, порівняно з RSA. Стійкість цих алгоритмів постійно оцінюється та перевіряється науковою спільнотою, і вразливості, хоч і рідко, можуть змусити до переходу на більш безпечні версії або алгоритми [7].

Аутентифікація та авторизація є невід'ємними компонентами забезпечення легітимності транзакцій, оскільки вони гарантують ідентифікацію користувача та надають йому відповідні права доступу. Ці процеси є критично важливими для збереження конфіденційності, цілісності та доступності даних в цифровому середовищі. Цифрові підписи використовуються для підтвердження автентичності відправника та цілісності повідомлення. Багатофакторна аутентифікація, що поєднує кілька методів ідентифікації (наприклад, пароль, SMS-код, біометрію), значно підвищує рівень безпеки, ускладнюючи несанкціонований доступ.

Аналізуючи дослідження [8, 2], хочемо відмітити, що існуючі архітектури безпеки в системах міжбанківських розрахунків часто включають в себе багатошаровий захист, з використанням мережевих екранів, систем виявлення вторгнень (IDS), та політик мінімальних привілеїв. SWIFT, наприклад, розробив Customer Security Programme (CSP) для посилення безпеки своїх користувачів, зосереджуючись на контролі доступу, захисті інфраструктури та виявленні аномалій.

Незважаючи на впровадження цих заходів, поточні рішення мають певні недоліки та обмеження. Застарілі протоколи та алгоритми можуть залишатися в експлуатації, створюючи вразливості для атак. Складність управління криптографічними ключами, особливо в розподілених системах, також є проблемою. Недостатня масштабованість може обмежувати здатність систем безпеки адаптуватися до зростаючих обсягів транзакцій та нових платіжних каналів. Людський фактор, включаючи помилки конфігурації та соціальну інженерію, залишається значним ризиком. Крім того, поява квантових комп'ютерів представляє серйозну загрозу для багатьох існуючих криптографічних алгоритмів, вимагаючи переходу на постквантову криптографію.

Для ефективного протистояння сучасним кіберзагрозам, необхідна комплексна криптографічна архітектура для міжбанківських платежів, яка відповідатиме суворим вимогам щодо безпеки, продуктивності, масштабованості та сумісності. Безпека вимагає надійного захисту даних від несанкціонованого доступу, зміни або знищення, а також забезпечення автентичності та цілісності транзакцій. Продуктивність критична для обробки великих обсягів транзакцій у реальному часі без значних затримок. Масштабованість необхідна для адаптації до зростаючих обсягів транзакцій та нових платіжних каналів. Сумісність забезпечує інтеграцію з існуючими системами та стандартами, мінімізуючи витрати на впровадження.

Запропонована архітектура включає в себе кілька взаємопов'язаних компонентів.

- Модуль шифрування даних забезпечує конфіденційність інформації, використовуючи сучасні криптографічні алгоритми, такі як AES-256 для симетричного шифрування та ECC з ключами достатньої довжини для асиметричного шифрування. Ключовим аспектом цього модуля є ефективне управління криптографічними ключами, яке включає генерацію, зберігання, розподіл та ротацію ключів із використанням апаратних модулів безпеки (HSM) для захисту ключової інформації.

- Модуль аутентифікації та авторизації забезпечує ідентифікацію користувачів та перевірку їхніх прав доступу. Багатофакторна аутентифікація, що поєднує знання (пароль), володіння (токен, мобільний пристрій) та біометричні характеристики (відбитки пальців, розпізнавання обличчя), значно підвищує рівень безпеки. Біометричні методи, зокрема, стають все більш популярними завдяки зручності та складності їх підробки.

- Модуль виявлення та запобігання вторгненням (IDS/IPS) призначений для виявлення та блокування атак на мережу та системи. IDS аналізує трафік у реальному часі, виявляючи аномальну поведінку та підозрілу активність. IPS автоматично реагує на виявлені загрози, блокуючи шкідливий трафік та ізолюючи скомпрометовані системи.

- Модуль аудиту та моніторингу безпеки забезпечує збір, аналіз та зберігання даних про всі події, пов'язані з безпекою. Це дозволяє виявляти інциденти безпеки, проводити розслідування та вдосконалювати політику безпеки. Механізми захисту від внутрішніх загроз включають суворий контроль доступу, розмежування обов'язків, періодичні перевірки безпеки та навчання персоналу з питань безпеки.

Крім того, архітектура включає застосування сучасних криптографічних технологій. Гомоморфне шифрування дозволяє виконувати обчислення над зашифрованими даними без їх розшифрування, забезпечуючи конфіденційність при обробці даних. Блокчейн може бути використаний для забезпечення прозорості та незмінності транзакцій. Безпечні обчислення дозволяють кільком сторонам спільно обчислювати функцію над своїми приватними даними, не розкриваючи їх один одному.

Обробка та зберігання криптографічних ключів здійснюється з використанням спеціалізованих HSM, які забезпечують високий рівень фізичного та логічного захисту. Ключі генеруються, зберігаються та використовуються всередині HSM, що запобігає їхньому витоку або компрометації. Регулярна ротація ключів зменшує ризик компрометації, а резервне копіювання ключів забезпечує їхнє відновлення у разі втрати або пошкодження.

Для всебічної оцінки ефективності та надійності запропонованої комплексної криптографічної архітектури було розроблено комплексну модель, яка враховує як продуктивність, так і безпеку. Модель дозволяє імітувати реальне середовище міжбанківських платежів, враховуючи обсяги трафіку, типи транзакцій та можливі вектори атак. Вона охоплює основні компоненти архітектури, включаючи модулі шифрування, аутентифікації, виявлення вторгнень та аудиту, що дозволяє аналізувати їхню взаємодію та вплив на загальну продуктивність системи.

З метою отримання емпіричних даних було проведено серію експериментів, спрямованих на оцінку ключових показників продуктивності, таких як пропускна здатність та затримка обробки транзакцій. Експерименти проводилися на реалістичних наборах даних, що імітують типові сценарії міжбанківських платежів. Крім того, було проведено тестування на стійкість до атак, включаючи імітацію DDoS-атак, атак на криптографічні ключі та спроби несанкціонованого доступу. Під час експериментів реєструвалися ключові метрики, такі як час обробки транзакцій, кількість втрачених пакетів та відсоток успішно відбитих атак.

Таблиця 1

Пропускна здатність та затримка обробки транзакцій

Сценарій	Пропускна здатність (транзакцій/сек)	Затримка обробки (мілісекунд)
Базовий (звичайний трафік)	4500	5
Піковий (короткочасне збільшення трафіку)	4200	8
Високий (тривале високе навантаження)	3800	12
З використанням гомоморфного шифрування	2800	25

Пропускна здатність системи залишається високою у різних сценаріях навантаження, демонструючи здатність обробляти значні обсяги міжбанківських платежів. Збільшення затримки обробки при пікових навантаженнях та використанні гомоморфного шифрування є очікуваним, але залишається в прийнятних межах. Результати підтверджують придатність архітектури для реальних умов експлуатації з урахуванням балансу між безпекою та продуктивністю.

Таблиця 2

Стійкість до атак

Тип атаки	Відсоток успішно відбитих атак	Кількість втрачених пакетів (середнє)	Час відновлення після атаки (секунд)
DDoS	98%	50	10
Атака на ключі	100%	0	0
Несанкціонований доступ	95%	10	5

Запропонована архітектура демонструє високий рівень стійкості до різних типів атак, включаючи DDoS, атаки на криптографічні ключі та спроби несанкціонованого доступу. Високий відсоток успішно відбитих атак, низька кількість втрачених пакетів та швидкий час відновлення після атак свідчать про ефективність впроваджених механізмів захисту. Архітектура здатна забезпечити безперебійність роботи системи навіть в умовах активних кіберзагроз.

У сучасному світі зростаюча залежність від електронних міжбанківських платежів стикається з експоненціальним збільшенням кіберзагроз, що робить забезпечення безпеки цих систем критично важливим. Хоча існуючі системи, такі як SWIFT та SEPA, використовують різні організаційні та технічні заходи захисту, вони залишаються вразливими через застарілі протоколи, вразливості в програмному забезпеченні, недостатню масштабованість та людський фактор.

Для вирішення цих проблем запропоновано комплексну криптографічну архітектуру, яка включає в себе модулі шифрування даних, аутентифікації та авторизації, виявлення та запобігання вторгненням, а також аудиту та моніторингу безпеки. Ця архітектура використовує сучасні криптографічні

технології, такі як гомоморфне шифрування та блокчейн, та забезпечує ефективне управління криптографічними ключами за допомогою апаратних модулів безпеки (HSM).

Висновки дослідження. Результати моделювання та експериментів показали, що запропонована архітектура забезпечує високу пропускну здатність та низьку затримку обробки транзакцій, а також демонструє високу стійкість до різних типів атак, включаючи DDoS, атаки на криптографічні ключі та спроби несанкціонованого доступу. Вона забезпечує кращий баланс між безпекою та продуктивністю порівняно з існуючими рішеннями, підтверджуючи її придатність для реальних умов експлуатації в міжбанківських платіжних системах.

Список використаних джерел:

1. Блинов В., Череп О. Криптовалюта в міжнародних розрахунках. *Економіка та суспільство*. 2024. № 68. С. 63. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-68-63>.
2. Еркес О., Калита О., Сундук Т. Банківська система України в умовах війни. *Scientia Fructuosa*. 2022. № 4(144). С. 122–133.
3. Підвисоцький Є., Панченко А. Використання технології блокчейн для стабілізації банківської системи України. *Економіка та суспільство*. 2024. № 62. С. 152. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-62-152>.
4. Підхонний О. М., Демид В. М. Фінансові мотиви застосування блокчейн-технологій у банківській справі. *Економіка та суспільство*. 2021. № 34.
5. Руцишин Н., Пелех О., Козак А., Криворучко Н. Сучасний стан банківської системи України та перспективи її розвитку. *Вісник ЛТЕУ. Економічні науки*. 2024. № 75. С. 27–36.
6. Ситник Н., Прицак Я. Банківська система України в умовах війни. *Молодий вчений*. 2023. № 6(118). С. 94–98.
7. Столяренко О. М., Серажим Ю. В., Романець А. О. Роль цифрових валют у формуванні фінансової безпеки національних економік. *Здобутки економіки: перспективи та інновації*. 2025. № 14. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14678912>.
8. Черкашин І. Банківська система України в умовах війни: ключові виклики та важливі трансформації заради виживання. Формування механізму зміцнення конкурентних позицій національних економічних систем у глобальному, регіональному та локальному вимірах – 2023: матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції (м. Тернопіль, 31 березня 2023 р.). Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2023. С. 87–90.
9. Alharby M., Moorsel A. Blockchain-based Smart Contracts: A Systematic Mapping Study. arxiv. 2017. <https://doi.org/10.48550/arxiv.1710.06372>. URL: <https://arxiv.org/abs/1710.06372>.
10. Antonopoulos A. M. Mastering Bitcoin: Unlocking Digital Cryptocurrencies. 2017. URL: https://books.google.com.ua/books/about/Mastering_Bitcoin.html?id=ixmrbqaaqbaj&redir_esc=y. Дата звернення 11.03.25)
11. Arner W., Auer R., Frost J. Stablecoins: Risks, Potential and Regulation. *BIS Working Paper*. 2020. Vol. 905. URL: <https://ssrn.com/abstract=3979495>.
12. Böhme R., Christin N., Edelman B., Moore T. Bitcoin: Economics, technology, and governance. *Journal of Economic Perspectives*. 2015. Vol. 29(2). С. 213–238.
13. Catalini C., Gans J. S. Some Simple Economics of the Blockchain. *NBER Working Paper*. No. 22952. 2016. URL: https://www.nber.org/system/files/working_papers/w22952/w22952.pdf.
14. Nakamoto S. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. 2008. URL: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.
15. Szabo N. Formalizing and securing relationships on public networks. *First Monday*. 1997. Vol. 2(9). URL: <https://firstmonday.org/ojs/index.php/fm/article/view/548/469>.

УДК 004.942:519.718

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.1.37>

Олег БАРАБАШ

доктор технічних наук, професор,

професор кафедри інженерії програмного забезпечення в енергетиці

Національний технічний університет України «Київський політехнічний університет імені Ігоря Сікорського», bar64@ukr.net

ORCID: 0000-0003-1715-0761

Андрій МУСІЄНКО

доктор технічних наук, доцент,

професор кафедри інженерії програмного забезпечення в енергетиці

Національний технічний університет України «Київський політехнічний університет імені Ігоря Сікорського», mysienkoandrey@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1849-6716

Ольга СВИНЧУК

кандидат фізико-математичних наук, доцент,

доцент кафедри інженерії програмного забезпечення в енергетиці

Національний технічний університет України «Київський політехнічний університет імені Ігоря Сікорського», 7011990@ukr.net

ORCID: 0000-0001-9032-6335

Олексій ДУДКІН

студент-магістр кафедри інженерії програмного забезпечення в енергетиці

Національний технічний університет України «Київський політехнічний університет імені Ігоря Сікорського», linkalex469@gmail.com

ОЦІНКА ЙМОВІРНОСТІ ЗВ'ЯЗНОСТІ СТРУКТУР ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ НА РІЗНИХ ГРАФОВИХ МОДЕЛЯХ

Анотація. Функціональна стійкість інформаційних систем є ключовим фактором їхньої надійності, особливо для критичної інфраструктури, хмарних сервісів та розподілених мереж. Відмова окремих компонентів може призвести до значних економічних і технічних втрат. Оцінка ймовірності зв'язності системи на основі графових моделей дозволяє прогнозувати її стійкість до збоїв.

Метою статті є аналіз та порівняння різних методів оцінки функціональної стійкості інформаційних систем на основі графових моделей, а також розробка програмного забезпечення для їхнього моделювання.

Методологія. У статті досліджено основні методи оцінки функціональної стійкості інформаційних систем та проведено порівняльний аналіз точних і наближених методів розрахунку. Також розроблено програмний інструмент для візуалізації та аналізу функціональної стійкості мережевих структур, визначено вплив різних параметрів системи на її загальну стійкість.

Наукова новизна роботи полягає у розробці підходу до оцінки функціональної стійкості інформаційних систем на основі графових моделей, порівнянні точних і наближених методів, створенні програмного інструменту для моделювання та аналізу зв'язності структур, а також виявленні ключових факторів, що впливають на стійкість систем.

Висновок. Проведено аналіз методів оцінки функціональної стійкості інформаційних систем на основі графових моделей. Порівняно точні та наближені підходи, зокрема метод повного перебору, метод мінімальних шляхів, Езарі-Прошана та Литвака-Ушакова. Визначено, що вибір методу залежить від складності системи та вимог до точності розрахунків. Розроблене програмне забезпечення дозволяє моделювати та аналізувати функціональну стійкість різних графових структур. Отримані результати можуть бути використані для підвищення надійності та безперебійної роботи інформаційних систем.

Ключові слова: функціональна стійкість, програмне забезпечення, інформаційна система, графи, ймовірність, точні оцінки, наближені оцінки, моделювання.

Oleg BARABASH, Andrii MUSIENKO, Olha SVYNCHUK, Oleksii DUDKIN. ASSESSMENT OF THE PROBABILITY OF CONNECTION BETWEEN STRUCTURES OF INFORMATION SYSTEMS ON DIFFERENT GRAPH MODELS

Abstract. Functional stability of information systems is a key factor in their reliability, especially for critical infrastructure, cloud services, and distributed networks. The failure of individual components can lead to significant economic and technical losses. Assessing the probability of system connectivity based on graph models allows predicting its resilience to failures.

The aim of this paper is to analyze and compare different methods for assessing the functional stability of information systems based on graph models, as well as to develop software for their modeling.

Methodology. The paper examines the main methods for assessing the functional stability of information systems and conducts a comparative analysis of exact and approximate calculation methods. A software tool for visualizing and analyzing the functional stability of network structures has also been developed, determining the impact of various system parameters on overall stability.

Scientific novelty. The scientific contribution of this study lies in the development of an approach to assessing the functional stability of information systems based on graph models, comparing exact and approximate methods, creating a software tool for modeling and analyzing structural connectivity, and identifying key factors affecting system stability.

Conclusion. The paper analyzes methods for assessing the functional stability of information systems based on graph models. Exact and approximate approaches, including the full enumeration method, minimal path method, Ezary-Proshan method, and Litvak-Ushakov method, have been compared. It has been determined that the choice of method depends on the complexity of the system and the accuracy requirements. The developed software enables modeling and analyzing the functional stability of various graph structures. The obtained results can be used to enhance the reliability and continuous operation of information systems.

Key words: functional stability, software information system, graphs, probability, exact estimates, approximate estimates modeling.

Вступ. Сучасні інформаційні системи відіграють ключову роль у забезпеченні стабільної роботи підприємств, організацій та об'єктів критичної інфраструктури. Однак, навіть за високого рівня автоматизації, повністю виключити вплив людського фактора неможливо. Деякі завдання, зокрема адаптація систем до нових умов експлуатації, усунення помилок та прогнозування можливих збоїв, вимагають активної участі фахівців.

Прогнозування потенційних відмов і порушень у роботі інформаційних систем набуває особливої значення, оскільки дозволяє підвищити їхню функціональну стійкість – здатність зберігати працездатність за умов впливу зовнішніх і внутрішніх дестабілізуючих факторів. Аналіз існуючих методів оцінювання надійності та запобігання несправностям є необхідним кроком для розробки ефективних підходів до забезпечення безперебійної роботи систем.

Особливо важливою є функціональна стійкість розподілених інформаційних систем, що працюють у режимі реального часу, зокрема хмарних сервісів, вебзастосунків і систем керування критичною інфраструктурою. Втрата працездатності навіть окремих компонентів таких систем може спричинити значні економічні та операційні збитки. Тому дослідження механізмів прогнозування та запобігання збоєм є ключовим завданням у сфері розробки й експлуатації інформаційних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розв'язанню задач забезпечення функціональної стійкості присвячено багато наукових праць. У роботах [1-3] описуються основні поняття функціональної стійкості, визначено вимоги та критерії для функціонально стійких складних систем. Запропоновані методи для забезпечення відмовостійкості інформаційної системи [4-5], методи оцінки та усунення слабких місць у фізичній та функціональній інфраструктурі інформаційно-комунікаційних мереж [6], моніторингу та прогнозування її технічного стану [7], застосування ієрархічного підходу для організації засобів забезпечення функціональної стійкості [8-9]. У статті [10] досліджено можливості застосування нейронних мереж для діагностики стану систем та практичного застосування інструментарію нейронних мереж для виявлення та локалізації дефектів в роботі систем. У [11] розроблено алгоритми забезпечення функціональної стійкості системи управління центру обробки даних та визначення реального технічного стану системи, які утворюють дворівневу систему діагностування відмов. В [12] запропоновано будувати функціонально стійкі інформаційні системи на основі принципів багатoversійної різноманітності, багатопараметричної адаптації та багаторівневого управління деградацією системи.

У науковій літературі розглядається низка підходів до оцінки функціональної стійкості, зокрема класичні методи ймовірнісного аналізу, структурного моделювання та графових алгоритмів.

У статті [13] проводиться порівняльний аналіз класичних ймовірнісних методів, а саме точного методу повного перебору станів системи та наближеного методу Литвака-Ушакова. Наведено два приклади інформаційної системи у вигляді простих графів, на яких демонструється ймовірності зв'язності між початковою та останньою вершинами вибраними методами. Розглянуто їх переваги та недоліки по відношенню один до одного та робиться загальний висновок щодо специфіки їх застосування.

У статті [14] запропоновано підхід щодо оцінювання надійності функціонування підсистеми передачі даних автоматизованої системи управління авіацією та протиповітряною обороною на основі методу мінімальних шляхів і мінімальних перетинів. Розглянуті математичні методики оцінювання надійності інформаційних систем, що можуть бути використані при оцінюванні надійності підсистеми передачі даних автоматизованої системи управління авіацією та протиповітряною обороною.

У статті [15] проведено порівняльний аналіз підходів, методів та формалізованих математичних описів, що застосовуються для оцінювання функціональної стійкості гетерогенних інформаційних

систем. Наведено формалізовані описи структурного та імовірнісного критеріїв функціональної стійкості структури гетерогенної інформаційної системи та методики розрахунку узагальненого ймовірного показника функціональної стійкості як згортки матриці зв'язності структури.

У статті [16] проаналізовано стан, напрями та основні причини зростання кількості інцидентів інформаційної безпеки. Підвищення рівня захищеності мережових інформаційних систем від дисфункційних станів досягнуто завдяки розвитку методу управління функціональною стійкістю інформаційних систем на основі оптимізації видатків на захист.

У статті [17] проводиться оцінка меж надійності для когерентних подвійних систем і порівняння різних меж надійності з точки зору суб'єктивних, математичних факторів і факторів ефективності за допомогою різних методів апроксимації в порівнянні з методом Езарі-Прошана.

Провівши аналіз, виявлено, що більшість наявних досліджень не враховує вплив специфічних архітектурних особливостей систем, а також не дає чітких рекомендацій щодо вибору методів оцінки в залежності від їхньої складності та вимог до точності.

Метою статті є аналіз та порівняння різних методів оцінки функціональної стійкості інформаційних систем на основі графових моделей, а також розробка програмного забезпечення для їхнього моделювання.

Для досягнення цієї мети в статті потрібно:

- дослідити основні методи оцінки функціональної стійкості інформаційних систем;
- провести порівняльний аналіз точних і наближених методів розрахунку;
- розробити програмний інструмент для візуалізації та аналізу функціональної стійкості мережових структур;
- визначити вплив різних параметрів системи на її загальну стійкість.

Виклад основного матеріалу. Функціональна стійкість інформаційної системи визначається її здатністю виконувати заданий перелік функцій з мінімально допустимою або регламентованою кількістю помилок за умов впливу дестабілізуючих факторів. Це поняття охоплює не лише прогнозування можливих проблем, а й адаптивну реакцію системи на постійно діючі чинники, що можуть впливати на її стабільність. Функціональна стійкість інформаційної системи зазвичай розглядається через призму ймовірності її коректного функціонування. Це означає, що існує певна ймовірність безперешкодної передачі інформації між окремими елементами системи або, навпаки, ймовірність відмови окремих її компонентів [1]. Графічне представлення інформаційної системи можливе у вигляді неорієнтованого графа, де кожна вершина відповідає конкретному елементу системи, а ребра моделюють зв'язки між ними. У такій моделі кожній вершині присвоюється унікальний номер, а також визначаються початковий та кінцевий елементи. Далі необхідно розрахувати ймовірності справності кожного зв'язку, що дозволить оцінити загальну ймовірність успішного виконання головного завдання системи – передачі спеціалізованих даних від початкового елемента до кінцевого. Такий підхід дає змогу формалізувати процес оцінки надійності системи та застосовувати математичні методи для аналізу її стійкості.

Для ефективного прогнозування можливих збоїв у функціонуванні інформаційної системи необхідно забезпечити максимально точну оцінку функціональної стійкості системи. Проте, в реальних умовах більшість інформаційних систем є складними, що ускладнює проведення точних розрахунків. Навіть за умови використання сучасних обчислювальних потужностей, виконання таких розрахунків може виявитися надмірно ресурсомістким і потребувати значних обчислювальних витрат. На даний час вже існує низка методів для функціональної стійкості. Кожен із цих методів має як переваги, так і певні обмеження. Деякі підходи дозволяють отримати більш точні результати, але потребують значних обчислювальних ресурсів, тоді як інші, менш ресурсомісткі методи, можуть давати лише наближені оцінки. Таким чином, вибір конкретного методу оцінки функціональної стійкості залежить від складності системи, доступних обчислювальних ресурсів, а також необхідного рівня точності прогнозування можливих збоїв у її роботі. Найбільш відома класифікація методів оцінки функціональної стійкості – точні та наближені [1].

Точні методи використовують строгі математичні моделі для оцінки параметрів стійкості систем. Вони забезпечують високу точність результатів, але часто вимагають значних обчислювальних ресурсів та часу. Точні методи ідеально підходять для систем з відносно простою структурою та невеликою кількістю компонентів, де можливе детальне математичне моделювання. Відомі методи: метод повного перебору, метод структурних перетворень графа, метод пошуку всіх простих ланцюгів, метод пошуку всіх простих перетинів.

Найпростішим і найточнішим є *метод повного перебору станів*, тобто повного перебору усіх можливих працездатних станів при визначенні їх ймовірностей P_{ij} в системі. Аналізуючи працездатність кожного стану, необхідно враховувати число елементів, що відмовили, та їх розташування в системі. Якщо

кількість ребер графа дорівнює n , то кількість станів для аналізу – це 2^n , оскільки стан ребра може бути працездатний (p) або непрацездатний ($q=1-p$). Ймовірність безвідмовної роботи системи визначається як сума ймовірностей всіх працездатних станів.

Нехай в даній структурі системи вершини є абсолютно справними, а ребра можуть знаходитися як в справному стані, так і в несправному. Ймовірності справного стану кожного ребра є однаковою для всіх і дорівнює p . Якщо система має послідовне та паралельне з'єднання елементів, то для знаходження ймовірності зв'язності між двома вершинами використовуються формули:

$$P_{ij} = \sum_{k=1}^m p(s_k), \quad P_{ij} = 1 - \prod_{k=1}^m (1 - p(s_k)), \quad (1.1)$$

де m – кількість шляхів sk , які з'єднують вершини vi та vj , а $p(sk)$ – ймовірність справності цього шляху [13].

Якщо ж структура системи є розгалуженою, тобто не є послідовно-паралельною, то її потрібно перетворити до такого з'єднання елементів, щоб можна було використовувати формули (1.1). Якщо це зробити неможливо, то такі системи називаються структурно-складними. Прикладами таких систем є місткові системи або комбінації місткових схем. Щоб визначити всі стани робочі стани системи, можна використовувати структурну функцію надійності $\Phi(x)$, і для неї знаходити досконалу диз'юнктивну нормальну форму (ДДНФ), яка є єдиною для конкретної булевої функції. Потім з ДДНФ легко можна перейти до формули для оцінки ймовірності безвідмовної роботи системи.

Також для знаходження ймовірності перебування графа в стані, коли серед n ребер i штук відмовили, можна використовувати формулу Бернуллі:

$$P_n(i) = C_n^i q^i p^{n-i}. \quad (1.2)$$

Знайдемо ймовірність зв'язності між всіма вершинами графу на (рис. 1).

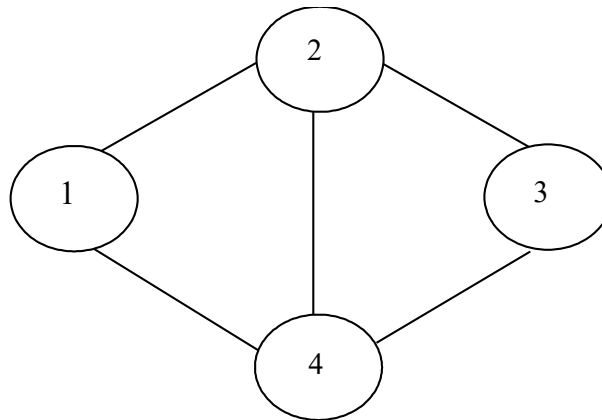


Рис. 1. Приклад графу місткової структури

Знайдемо ймовірність зв'язності між вершинами 1 та 3:

- безвідмовна робота всіх ребер – p^5 ;
- відмова одного з ребер – $C_5^1 q p^4 = 5q p^4$;
- відмова будь-яких двох ребер – $C_5^2 q^2 p^3 = 10q^2 p^3$, крім двох випадків, коли два ребра інцидентні або вершині 1, або вершині 3, тобто $8q^2 p^3$;
- відмова будь-яких трьох ребер – $C_5^3 q^3 p^2 = 10q^3 p^2$, але з 10 випадків потрібно залишити 2 випадки, коли відмовлять три ребра інцидентні або вершині 2, або вершині 4, тобто $2q^3 p^2$.

Отримаємо:

$$P_{13} = p^5 + 5q p^4 + 8q^2 p^3 + 2q^3 p^2 = 2p^5 + 5p^4 + 2p^3 + 2p^2.$$

Аналогічно провівши обрахунки для інших пар вершин, отримаємо:

$$P_{12} = P_{14} = P_{32} = P_{34} = p^5 + 5q p^4 + 9q^2 p^3 + 5q^3 p^2 + q^4 p,$$

$$P_{24} = p^5 + 5q p^4 + 10q^2 p^3 + 8q^3 p^2 + q^4 p.$$

Тепер порахуємо ймовірність зв'язності всієї системи:

- всі ребра справні, то граф зв'язний – p^5 ;
- у випадку відмови одного з ребер зв'язність зберігається – $5qp^4$;
- у випадку відмови двох ребер граф не буде зв'язним, якщо несправні будуть ребра, інцидентні або вершині 4, або вершині 2, тобто $8q^2p^3$.

Отримаємо:

$$P = p^5 + 5qp^4 + 8q^2p^3.$$

Порівнявши всі отримані ймовірності:

$$P < P_{\min} = P_{13} < P_{12} = P_{14} = P_{23} = P_{34} < P_{24} = P_{\max},$$

можна зробити висновок, що ймовірність зв'язності всієї системи не перевищує ймовірності зв'язності між будь якою парою вершин графа.

Аналогічно знайдемо ймовірності зв'язності для повних графів K_n , де кількість ребер обчислюється як $n(n-1)/2$:

$$1) P(K_3) = p^3 + 3qp^2;$$

$$2) P(K_4) = p^6 + 6qp^5 + 15q^2p^4 + (C_6^3 - 4)q^3p^3;$$

$$3) P(K_5) = p^{10} + C_{10}^1 qp^9 + C_{10}^2 q^2 p^8 + C_{10}^3 q^3 p^7 + (C_{10}^4 - 5)q^4 p^6 + (C_{10}^5 - (n-1)nC_6^1)q^5 p^5 + (C_{10}^6 - nC_6^2 - 2n)q^6 p^4.$$

Як видно, чим більше ребер має граф, тим формули стають більш громіздкими. Однак, системи у вигляді повних графів на практиці зустрічаються дуже рідко. Метод повного перебору є найточнішим серед усіх відомих точних методів, але для обчислення стійкості доволі великих систем може потребувати занадто багато часу та ресурсів, тобто його недоліком є громіздкість обчислень.

Наближені методи, в свою чергу, засновані на статистичних або евристичних підходах, що дозволяють отримати оцінку стійкості швидше і з меншими витратами ресурсів. Ці методи підходять для складних систем, де точне моделювання є непрактичним. Вони дають наближену оцінку ймовірності зв'язності між елементами системи, тобто верхню і нижню оцінку. Найбільш відомими є методи Езарі-Прошана, Литвака-Ушакова та Полеського [1]. Інколи методи Езарі-Прошана і Литвака-Ушакова застосовують разом, використовуючи переваги обох методів.

Метод Езарі-Прошана (або метод мінімальних шляхів і перетинів) дозволяє отримати нижню і верхню оцінки надійності за рахунок знаходження мінімальних шляхів та мінімальних перетинів. Мінімальний шлях – це простий шлях, який утворюється з послідовності зв'язаних елементів, працездатність яких забезпечує роботу системи, а відмова хоча б одного елемента призводить до відмови усієї системи. Такий шлях не проходить жодну вершину більше одного разу і не утворює циклів. Якщо хоча б один мінімальний шлях залишається працездатним, система не відмовляє. Мінімальний перетин – це мінімальна сукупність ребер, видалення яких перериває всі шляхи між вузлами. Це означає, що система перестає працювати, якщо відмова присутня у всіх ребер цієї сукупності. Відповідно нижня оцінка розраховується за допомогою мінімальних перетинів, а верхня – за допомогою мінімальних шляхів. За формулою (1.3) розраховується ймовірність безвідмовної роботи усієї системи у загальному випадку:

$$\prod_{1 \leq j \leq N} \left(1 - \prod_{i \in B_k} q_i \right) \leq P \leq 1 - \prod_{1 \leq j \leq M} \left(1 - \prod_{i \in A_k} p_i \right), \quad (1.3)$$

де $\{A_1, A_2, \dots, A_M\}, \{B_1, B_2, \dots, B_N\}$ – множини мінімальних шляхів і мінімальних перетинів,

M, N – кількості мінімальних шляхів і мінімальних перетинів відповідно,

p_i – ймовірність справності ребра,

q_i – ймовірність відмови ребра.

Хоч даний метод є наближеним, проте він допомагає зменшити кількість обрахунків. Значення ймовірності, отримане за допомогою методу повного перебору, буде лежати у проміжку між нижньою та верхньою оцінками за Езарі-Прошана. Верхню межу можна використовувати просто як перебір простих шляхів, замінюючи метод повного перебору, однак точність обрахунків після цього падає.

Метод Литвака-Ушакова є модифікацією методу Езарі-Прошана. Даний метод знаходить множини непересічних мінімальних шляхів і непересічних мінімальних перетинів. Всі мінімальні шляхи подаємо у вигляді паралельного сполучення, а мінімальних перетинів – послідовного з'єднання. За формулою (1.4) розраховуються граничні оцінки ймовірності безвідмовної роботи усієї системи у загальному випадку:

$$\min_{1 \leq t \leq T} \left\{ 1 - \prod_{1 \leq k \leq m_t} \left(1 - \prod_{i \in B_k^t} q_i \right) \right\} \leq P \leq \max_{1 \leq s \leq S} \left\{ 1 - \prod_{1 \leq k \leq n_s} \left(1 - \prod_{i \in A_k^s} p_i \right) \right\}, \quad (1.4)$$

де S, T – число всіх підмножин реберно непересічних шляхів та непересічних перетинів відповідно,
 A_k^s – k -та підмножина ребер в s -му наборі шляхів,
 B_k^t – k -та підмножина ребер в t -му наборі перетинів,
 n_s – число різних непересічних мінімальних шляхів в s -ій підмножині,
 m_t – число різних непересічних мінімальних перетинів в t -ій підмножині,
 p_i – ймовірність справності окремого елемента,
 q_i – ймовірність відмови окремого елемента.

Метод Литвака-Ушакова є більш точним за Езарі-Прошана, однак потребує визначення непересічних між собою мінімальних шляхів та мінімальних перетинів і тому закономірно потребує більше часу на обробку.

Для тестування будуть обиратися графи моделей систем із не більше ніж 25 зв'язками (ребрами), оскільки далі обрахунки стають дуже складні і фактично в такій ситуації можна розділити граф на окремі частини, щоб протестувати кожну з них незалежно одна від іншої.

Для аналізу функціональної стійкості системи будемо візуалізувати систему у вигляді графу, який детально описує вершини та зв'язки між ними, надаючи інтуїтивно зрозумілий інтерфейс для аналізу інформаційної системи. Вершини на графі представляють різні компоненти системи, такі як маршрутизатори, комутатори, сервери та інші пристрої. З'єднання між цими вершинами візуалізуються у вигляді ліній, що показують логічні зв'язки.

Для оцінки функціональної стійкості системи, яка представлена у вигляді графа, користувачу потрібно обрати метод: метод мінімальних шляхів (Simple paths) та метод Литвака-Ушакова (Litvak-Ushakov).

На (рис. 2) зображений порівняльний аналіз функціональної стійкості між першою та останньою вершинами (1-4) для повного графа K_4 . У вікні аналізу для кожного з методів представлені:

- загальна формула обрахунку ймовірності зв'язності між двома вершинами P і формула для частинного випадку, коли $p = \text{const}$;
- графік залежності ймовірності зв'язності P від ймовірності справності ребер p , що дає можливість візуально оцінити загальну функціональну стійкість обраної системи;
- віконце, де користувач може самостійно встановлювати значення ймовірностей справності від 0 до 1 відносно кожного ребра графа;
- числове значення ймовірності зв'язності між двома вершинами P .

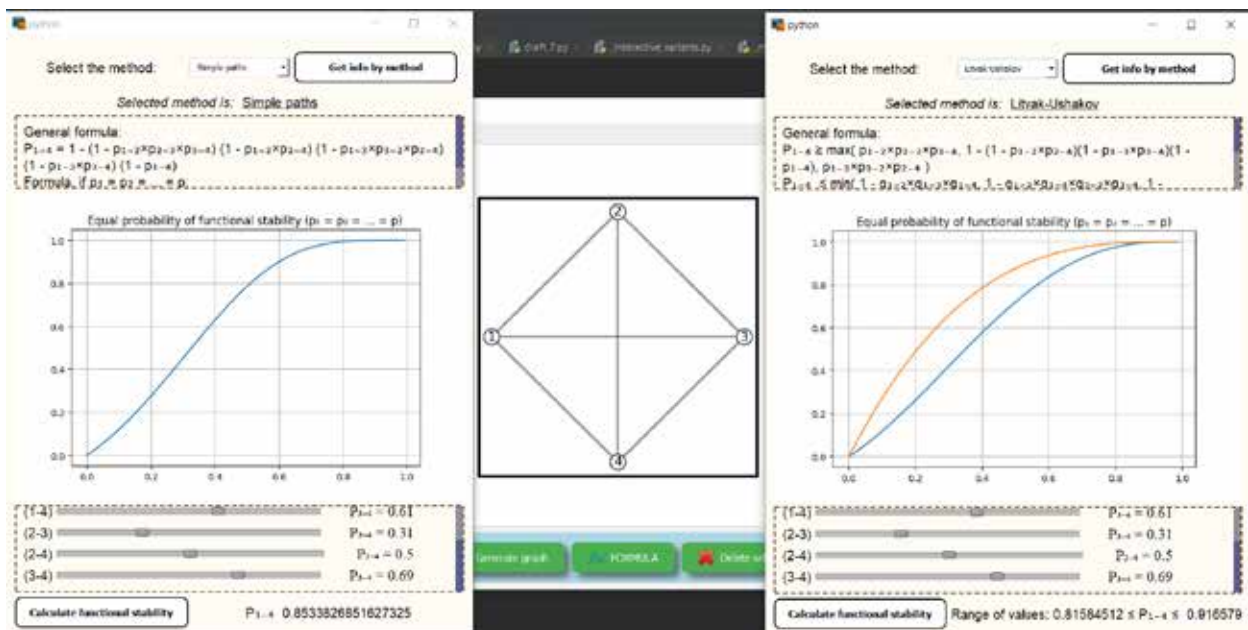


Рис. 2. Порівняльний аналіз повного графа K_4

Значення ймовірності зв'язності P_{1-4} , отримані за методом мінімальних шляхів, розташовані між граничними оцінками Литвака-Ушакова. Метод мінімальних шляхів є верхньою оцінкою згідно з методом Езарі-Прошана і тому це не є максимально точний результат. Проте можна зробити висновок,

що якщо значення нижньої оцінки Литвака-Ушакова і мінімальних шляхів майже співпадають, то це вказує на те, що вони дуже близькі до точного значення.

На (рис. 3) зображений результат тестування повного графу K_8 .

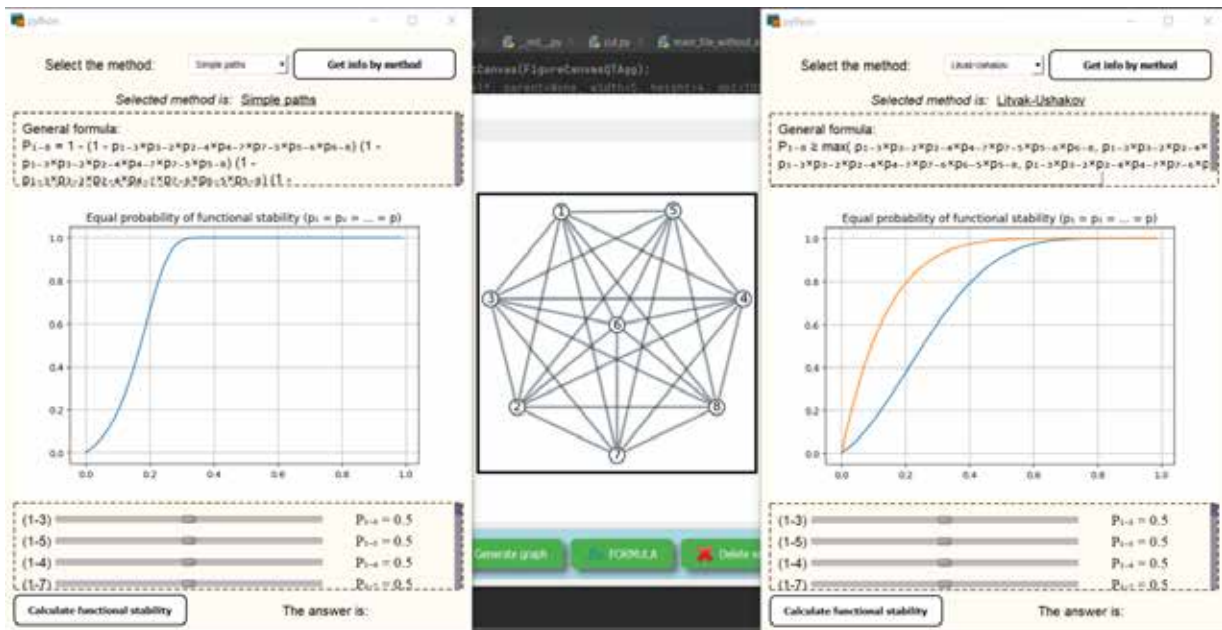


Рис. 3. Порівняльний аналіз повного графу K_8

Лівий графік швидко зростає і при значенні ймовірності для кожного ребра $p=0,3$ наближується одиниці. Також можна побачити, що верхня оцінка правого графіка на проміжку $p \in (0,2; 0,5)$ є меншою, ніж значення лівого графіку. Це означає, що там, де лівий графік швидко зростає і отримує значення одиниці, присутня похибка.

Також проаналізуємо повний граф K_9 для кожного методу (рис. 4).

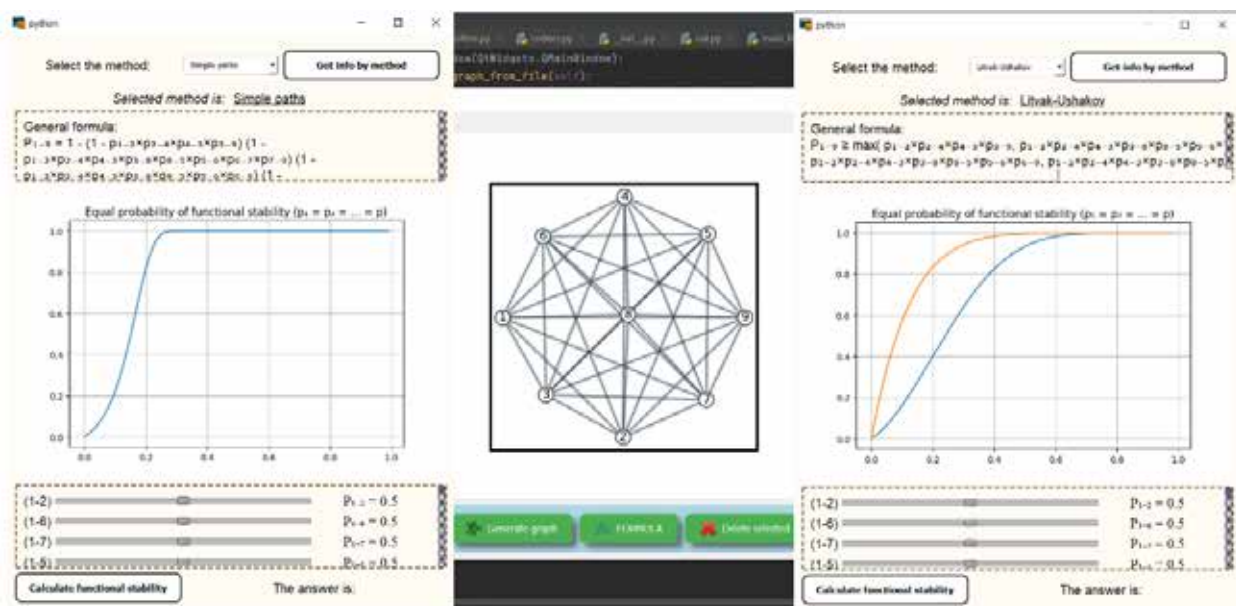


Рис. 4. Порівняльний аналіз повного графу K_9

В обох методах спостерігається пороговий ефект: при малих значеннях p ймовірність функціональної стійкості низька, але після певного значення p вона швидко зростає. Порівнявши графіки, можна

зробити висновок, що чим більше вершин в повному графі, тим швидше зростає значення ймовірності зв'язності P .

Надалі розрахунки саме повних графів не мають сенсу, оскільки розрахунок за методом Литвака-Ушакова вже зайняв десть принаймні 4 секунди у 8-вершинного графа і аж 26 секунд у 9-вершинного. Користувач може генерувати власний граф, задаючи кількість вершин від 2 до 20, та кількість ребер від 0 до можливого максимуму $n(n-1)/2$, де n – кількість вершин. Така генерація зв'язності не гарантує, однак користувач завжди має змогу відредагувати граф відповідним чином до поставленої задачі. Дослідимо ще декілька різноманітних зв'язних графів, які не є повними.

На (рис. 5) згенерований граф з 11 вершинами. Для даного графа спостерігається велика гранична верхня оцінка в результаті того, що мінімальних перетинів у даного графа багато, і навіть після знайдених непересічних перетинів серед них оцінка сильно не впала. Крім того, можна навіть побачити, що на графіку верхньої оцінки після $x=0,2$ є точка перегину. Ймовірно причиною цього є той факт, що до цього значення спрацював один перетин, а після цього вже для головної ймовірності справності відіграє роль зовсім інший мінімальний перетин.

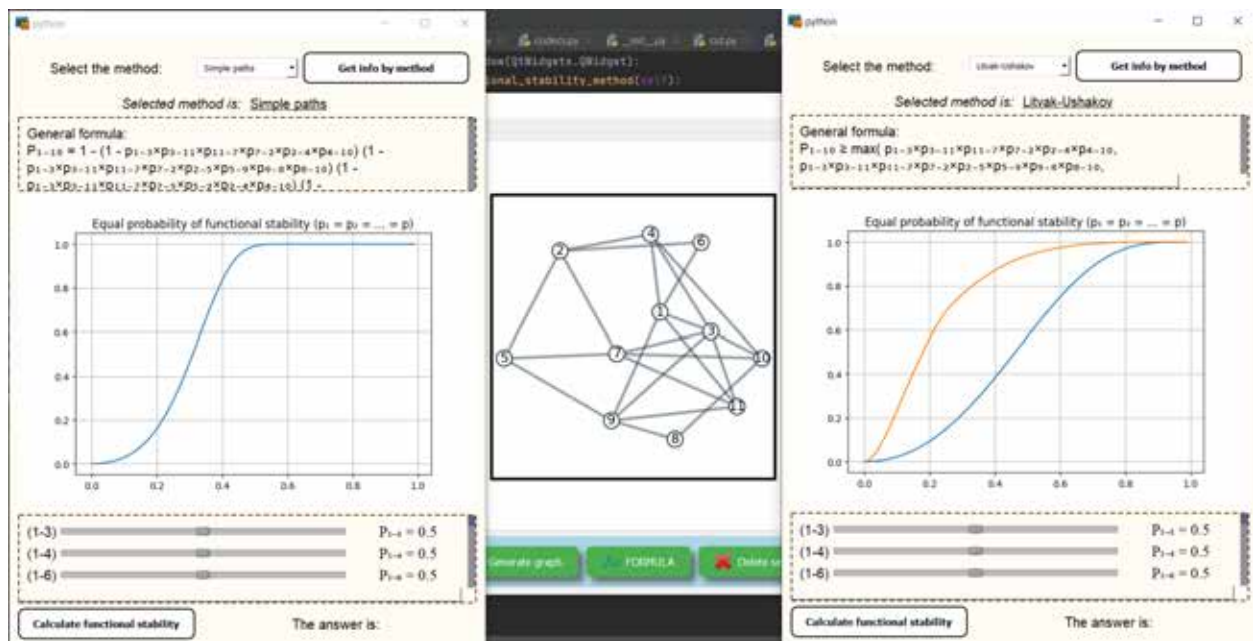


Рис. 5. Порівняльний аналіз зв'язного графа 1

Далі на рисунку 6 розглянемо наступний зв'язний граф з 10 вершин. Відзначимо, що незважаючи на його цікаву структуру, шляхи від першого до останнього десятого елемента цей граф має. Верхня оцінка Литвака-Ушакова, яка для попереднього графу здавалася зовеликою, а тут вже дуже сильно відрізняється від лівого графіка. Проаналізуємо сам граф. Його умовно можна поділити на три частини: вершина 1, вершини 2-7 та вершини 8-10. Очевидно, що якщо тут почати виділяти мінімальні перетини, то багато з них будуть непересічними, оскільки знаходяться у різних частинах, що й зменшує ймовірність.

Граф на рисунку 7 був згенерований та допрацьований власноруч в редакторі і має одну особливу характеристику – перша та остання вершини зв'язані, а усі інші вершини взагалі не мають жодних спільних ребер із першою.

Тут формула функції для графіку має простий вигляд – лінійна функція $y=x$. Уся система залежить лише від одного єдиного ребра, і ймовірність його справності просто дорівнює ймовірності справності усієї інформаційної системи. Якщо ми видалимо усі «зайві» ребра, які не пов'язані із першою вершиною в графі, то побачимо, що даний граф є графом-шляхом з одним єдиним ребром.

Здійснений аналіз методів оцінки функціональної стійкості інформаційних систем дозволив визначити ключові фактори, що впливають на їх надійність. Використання різних підходів до моделювання, зокрема методів на основі ймовірнісних розрахунків і структурного аналізу, дає змогу більш точно прогнозувати поведінку системи в умовах змінних параметрів. Отримані результати можуть бути застосовані для оптимізації архітектури інформаційних систем та підвищення їхньої стійкості до відмов.

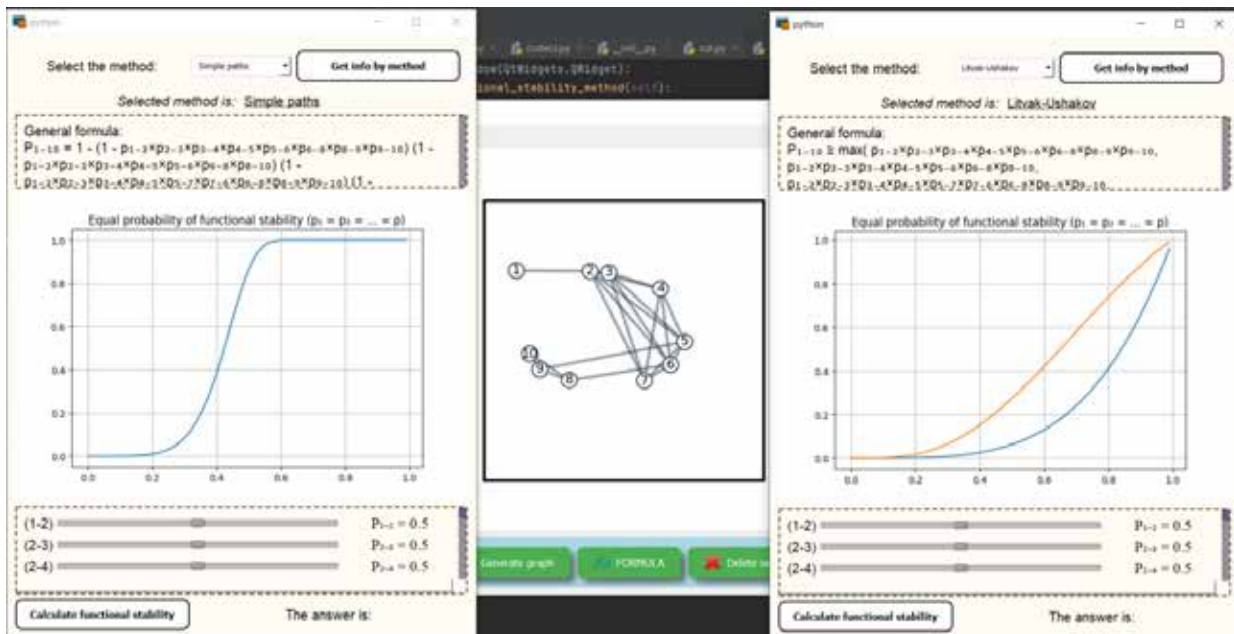


Рис. 6. Порівняльний аналіз зв'язного графа 2

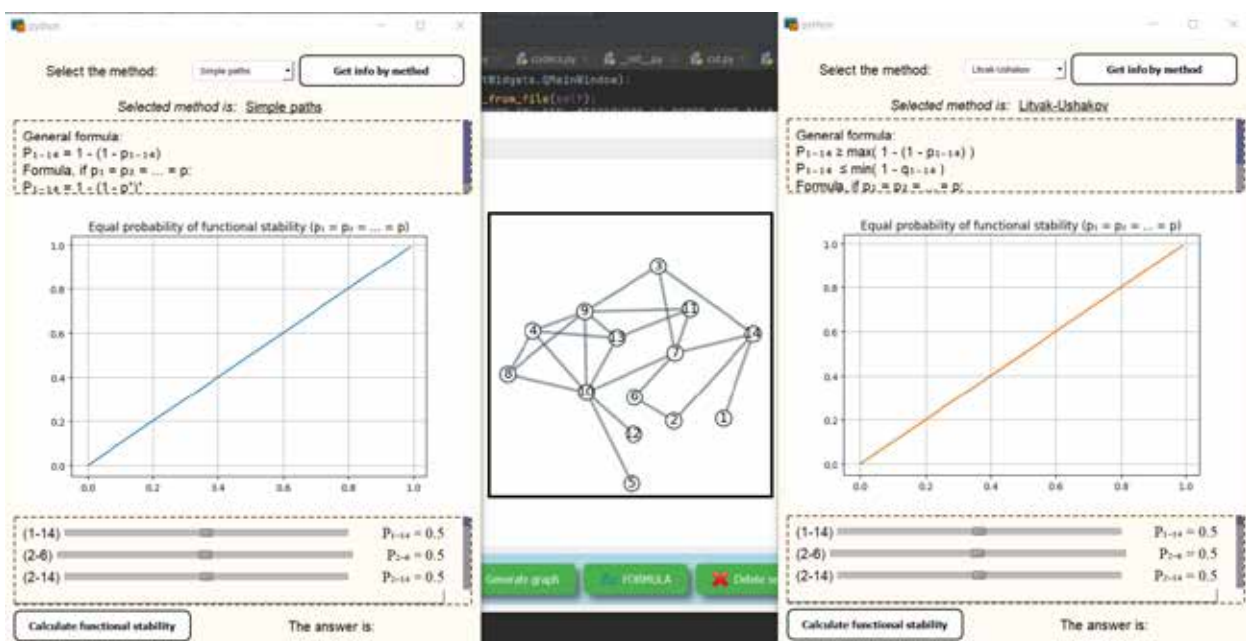


Рис. 7. Порівняльний аналіз зв'язного графа 3

Висновки. У ході дослідження було проведено аналіз функціональної стійкості інформаційних систем та методів її оцінки. Було розглянуто точні та наближені методи оцінки, зокрема методи Езарі-Прохана та Литвака-Ушакова, а також метод повного перебору. Порівняння цих методів продемонструвало, що вибір конкретного підходу залежить від складності системи, кількості її компонентів та вимог до точності оцінки.

Дослідження показало, що:

- функціональна стійкість інформаційних систем значною мірою залежить від структури графа системи – чим більше альтернативних шляхів зв'язку між елементами, тим вища ймовірність збереження працездатності системи в разі відмов окремих компонентів;
- метод повного перебору є найбільш точним, але потребує значних обчислювальних ресурсів, що робить його непридатним для складних систем;

- метод мінімальних шляхів забезпечує швидку оцінку, але не враховує всі можливі відмови, що може призводити до завищеної оцінки стійкості;
- метод Литвака-Ушакова є найбільш збалансованим, оскільки він враховує як мінімальні шляхи, так і мінімальні перетини, що дозволяє отримати більш точні оцінки в порівнянні з методом мінімальних шляхів;
- при збільшенні кількості вершин і зв'язків у графі точність оцінки методом наближених оцінок залишається прийнятною, тоді як точні методи стають менш ефективними через складність обчислень.

У подальших дослідженнях доцільним є розгляд гібридних методів оцінки функціональної стійкості, що поєднують високу точність із прийнятною швидкістю обчислень, а також удосконалення алгоритмів автоматичного виявлення критичних вузлів у структурі інформаційних систем.

Список використаних джерел:

1. Собчук В. В., Барабаш О. В., Мусієнко А. П. Основи забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем підприємств в умовах впливу дестабілізуючих факторів: монографія. Київ: Міленіум, 2022. 272 с. ISBN: 973-966-8063-82-3. URL: https://www.researchgate.net/publication/363474851_Basis_for_functional_stability_of_information_systems_businesses_under_the_influence_of_destabilizing_factors (дата звернення: 07.03.2025)
1. Mashkov O., Kosenko V. Ensuring of functional stability of difficult dynamic systems as one of urgent scientific tasks of modern theory of automatic control. *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2015, Vol. 5, no. 3. P. 39–42. <https://doi.org/10.5604/20830157.1166550>
2. Mashkov O., Chumakevych V., Sokulsky O., Chyrun L. Features of determining controlling effects in functionally-stable systems with recovery of control. *Mathematical Modeling and Computing*. 2019. Vol. 6, no. 1. P. 85–91. <https://doi.org/10.23939/mmc2019.01.085>
3. Peng S.-L., Lin C.-K., Tan J.J.M. and Hsu L.-H. The g-Good-Neighbor Conditional Diagnosability of Hypercube under PMC Model. *Applied Mathematics and Computation*. 2012. Vol. 218, no. 21. P. 10406–10412. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2012.03.092>
4. Yuan J., Liu A., Ma X., Liu X., Qin X. and Zhang J. The g-Good-Neighbor Conditional Diagnosability of k-Ary n-Cubes under the PMC Model and MM Model. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*. 2015. Vol. 2, no. P. 1165–1177. <http://doi.org/10.1109/TPDS.2014.2318305>
5. Бойко В., Василенко М., Слатвінська В. Моделювання живучості та відновлення інформаційно-комунікаційних мереж в умовах дії кіберзагроз. *Інформаційні технології та суспільство*. 2024. № 1 (12). С. 13–19. <https://doi.org/10.32689/maup.it.2024.1.2>
6. Barabash O., Sobchuk V., Musienko A., Laptiev O., Bohomia V., Kopytko S. System Analysis and Method of Ensuring Functional Sustainability of the Information System of a Critical Infrastructure Object. In: Zgurovsky, M., Pankratova, N. (eds) *System Analysis and Artificial Intelligence. Studies in Computational Intelligence*. 2023. Vol. 1107. Springer, Cham. P. 117–192. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37450-0_11
7. Sobchuk V., Barabash O., Musienko A., Svynchuk O. Adaptive accumulation and diagnostic information systems of enterprises in energy and industry sectors. *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 250. P. 82–87. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125008002>
8. Barabash O., Svynchuk O., Salanda I., Mashkov V., Myroniuk M. Ensuring the Functional Stability of the Information System of the Power Plant on the Basis of Monitoring the Parameters of the Working Condition of Computer Devices. *Advanced Information Systems*. 2024. Vol. 8, no. 2. P. 107–117. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.2.12>
9. Собчук А. В., Олімпієва Ю. І. Застосування нейромереж для забезпечення функціональної стійкості виробничих процесів. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2020. № 2 (67). С. 13–28. <http://doi.org/10.31673/2412-4338.2020.021328>
10. Василенко В. В., Льїн О. О., Березовська Ю. В., Космінський Р. В., Каргаполов Ю. В. Основні напрямки підвищення функціональної стійкості системи управління центру обробки даних. *Зв'язок*. 2019. № 1(137). С. 35–39. URL: <https://con.dut.edu.ua/index.php/communication/article/view/2233> (дата звернення: 07.03.2025)
11. Dodonov O., Gorbachyk O., Kuznietsova M. Analysis and assessment of functional stability of information systems supporting management processes. *International Scientific and Practical Conference «Information Technologies and Security (ITS-2022)»*. Ukraine: Kyiv, 2022. P. 1–10. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3503/paper1.pdf> (дата звернення: 07.03.2025)
12. Барабаш О. В., Мусієнко А. П., Макачук А. В. Порівняльний аналіз методів визначення показників функціональної стійкості інформаційних систем на прикладі повного перебору та методу Литвака-Ушакова. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2023. № 4. С. 57–63. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-76-7>
13. Коренівська І. С. Підхід щодо оцінювання надійності функціонування підсистеми передачі даних автоматизованої системи управління авіацією та протиповітряної обороною. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2019. № 3 (36). С. 15–18. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2019-36-3-15-18>
14. Гук О. М., Пермяков О. Ю., Нестеров О. М., Уварова Т. В. Аналіз існуючих підходів щодо оцінювання функціональної стійкості гетерогенних інформаційних систем військового призначення. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2020. № 3 (39). С. 39–18. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2020-39-3-39-44>
15. Шевченко А. В. Управління функціональною стійкістю інформаційних систем на основі оптимізації видатків на захист. *Інформатизація та управління проектами інформатизації Збройних сил*. 2018. № 3 (64). С. 90–96. <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2018-3-64/90-96>
16. Mutar E. Estimating the reliability of complex systems using various bounds methods. *International Journal of Systems Assurance Engineering and Management*. 2023. Vol. 14. P. 2546–2558. <http://doi.org/10.1007/s13198-023-02108-7>

НОТАТКИ

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
ТА СУСПІЛЬСТВО**

**INFORMATION TECHNOLOGY
AND SOCIETY**

ВИПУСК 1 (16)

ISSUE 1 (16)

2025

Коректура
Ірина Чудеснова

Комп'ютерна верстка
Наталія Кузнєцова

Формат 60x84/8. Гарнітура Cambria.
Папір офсет. Цифровий друк.
Підписано до друку 30.05.2025.
Ум. друк. арк. 33,95. Замов. № 0625/518. Наклад 300 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглєзі, 6/1
Телефон +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК No 7623 від 22.06.2022 р.