МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ТАВРІЙСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО

Журнал заснований у 1918 році

ВЧЕНІ ЗАПИСКИ

ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО

Серія: Технічні науки

Том 35 (74) № 6 2024

Частина 2

Видавничий дім
«Гельветика»
2024

Головний редактор:

Кисельов Володимир Борисович – доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту муніципального управління та міського господарства Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського.

Члени редакційної колегії:

Медведєв Микола Георгійович (відповідальний секретар) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;
Бронін Сергій Вадимович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем та технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка;
Домніч Володимир Іванович – кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;
Дехтяр Анатолій Соломонович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри архітектурних конструкцій Національної академії образотворчого мистецтва і архітектури;
Дичко Аліна Олегівна – доктор технічних наук, професор, професор кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;
Дубко Валерій Олексійович – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри вищої математики Київського національного університету технології та дизайну;
Єремєєв Ігор Семенович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;
Лисенко Олександр Іванович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Огородник Станіслав Станіславович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;
Сегай Олександр Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри загально-інженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;
Чумаченко Сергій Миколайович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач кафедри інформаційних систем Національного університету харчових технологій;
Цомко Олена – доктор філософії по спеціальності «Безпека і управління інформацією», відділення комп'ютерної інженерії, Інститут Міжнародної освіти, Університет Донгсо, Республіка Корея.

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

Рекомендовано до друку та поширення через мережу Internet
Вченою радою Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського
(протокол № 6 від 27.12.2024 року)

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

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

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б») з технічних наук (спеціальності: 144. Теплоенергетика, 161. Хімічні технології та інженерія, 172. Телекомунікації та радіотехніка) відповідно до Наказу МОН України від 17.03.2020 № 409 (додаток 1), 121. Інженерія програмного забезпечення, 123. Комп'ютерна інженерія, 126. Інформаційні системи та технології, 151. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, 275. Транспортні технології (за видами) відповідно до Наказу МОН України від 02.07.2020 № 886 (додаток 4)

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

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

ISSN 2663-5941 (Print)
ISSN 2663-595X (Online)

© Таврійський національний університет ім. В.І. Вернадського, 2024

ЗМІСТ

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

Батюк С.Г., Васянович В.М., Воронюк М.В., Ворошилов А.І.
ІНВАРІАНТНІ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТІВ УПРАВЛІННЯ І УНІВЕРСАЛЬНІ СТРУКТУРИ ПІД-РЕГУЛЯТОРІВ В ІМІТАЦІЙНОМУ МОДЕЛЮВАННІ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ.....1

Berezhna O.B.
SYNERGY OF INFORMATION TECHNOLOGIES AND NEURAL NETWORKS FOR TEXT CONTENT GENERATION.....13

Боровскова Є.А.
ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ СТРАТЕГІЙ КЕШУВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ СЕРВЕРНИХ ДОДАТКІВ НА NESTJS.....18

Гаращук Б.В.
МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ IOT-МЕРЕЖ НА ОСНОВІ БЛОКЧЕЙН ТЕХНОЛОГІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ПОЛЕГШЕНОГО АЛГОРИТМУ КОНСЕНСУСУ 27

Гіоргізова-Гай В.Ш., Кирюша Б.А.
ХМАРНІ ПОСЛУГИ В КОРПОРАТИВНІЙ ІНФРАСТРУКТУРІ.....32

Голубєв Л.П., Ківа І.Л.
АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПОБУТОВИМИ ПРИСТРОЯМИ НА БАЗІ HOME ASSISTANT.....40

Звєрєв В.П., Бушков В.Г.
КРОС-КАНАЛЬНІ АНТИФРОД-СИСТЕМИ ЯК ІНСТРУМЕНТ КОМПЛЕКСНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОННИХ КОМУНІКАЦІЙ ЦИФРОВОЇ ЕКОНОМІКИ.....46

Іванишин В.В., Мошенский А.О.
ОНТОЛОГІЧНА СТРУКТУРА ТА ПАРАМЕТРИ ВИМИРІВ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПАСІКОЮ.....56

Ilchuk M.S.
A ROBUST BARCODE DETECTION SYSTEM WITH MACHINE LEARNING.....63

Касерес А., Глоба Л.С.
ІНТЕГРАЦІЯ ШІ ТА МУЛЬТИАГЕНТНИХ СИСТЕМ ДЛЯ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО АНАЛІЗУ У МУЛЬТИХМАРНОМУ СЕРЕДОВИЩІ.....68

Кириченко Є.О., Кириченко О.Л.
ПОБУДОВА МОДЕЛЕЙ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ У ХМАРНОМУ СЕРЕДОВИЩІ ЗАСОБАМИ AWS EMR.....75

Козуб В.В.
ПРАКТИКА ВИКОРИСТАННЯ НОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ В МІКРОСЕРВІСНІЙ АРХІТЕКТУРІ ПОБУДОВИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....80

Коротинський А.П., Абрамова А.О., Складанний Д.М.
РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛІ РЕКТИФІКАЦІЙНОЇ КОЛОНИ У ВИРОБНИЦТВІ ОЦТОВОЇ КИСЛОТИ ТА ЇЇ СПРОЩЕННЯ ДЛЯ ЗАДАЧ КЕРУВАННЯ.....89

Курганов І.Д., Харламенко В.Ю.
МОДЕЛЮВАННЯ ПРИВОДНОГО БАРАБАНА СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА ЯК ОБ'ЄКТА УПРАВЛІННЯ СИСТЕМИ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ.....98

Лобанчикова Н.М., Лисенко М.С.
АНАЛІЗ СТАНУ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МАЛОМОБІЛЬНИХ ГРУП НАСЕЛЕННЯ ВІРТУАЛЬНИМ СУПРОВОДОМ В МЕДИЧНИХ ЗАКЛАДАХ.....104

Марчук Д.М., Фесюк І.І., Роса Т.В., Карпін О.О., Максимюк Т.А.
ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ ТА ІНТЕРПРЕТОВАНОСТІ АЛГОРИТМІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ.....112

Надутенко М.В., Василенко О.Д.
КОНЦЕПЦІЯ AGI-ALS ТА ЇЇ МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ.....117

Nevliudov I.Sh., Yevsieiev V.V., Gurin D.V.
DEVELOPMENT OF A MODEL OF DYNAMIC DESCRIPTION OF THE ENVIRONMENT OF A COLLABORATIVE MANIPULATOR ROBOT WITHIN THE CONCEPT OF INDUSTRY 5.0....128
Новак Д.С., Мошенський А.О., Гуйда О.Г., Омецинская Н.В., Дроменко В.Б.
РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ СЕГМЕНТАЦІЇ СУПУТНИКОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ СУЧАСНИХ ОПЕРАЦІЙНИХ СИСТЕМ....134
Oleshchenko L.M.
SOFTWARE IMPLEMENTATION OF THE HUFF GRAVITY MODEL FOR OPTIMAL SPATIAL PLACEMENT OF URBAN SERVICE FACILITIES....140
Oleshchenko L.M., Tarelkina K.O.
USER-DRIVEN VIDEO COLORIZATION SYSTEM DEVELOPMENT USING GENERATIVE ADVERSARIAL NEURAL NETWORK....149
Орлов М.В., Грибовський О.М., Жовнір Ю.І., Дуда О.М.
ВІД КОНЦЕПЦІЇ ДО РЕАЛЬНОСТІ: РОЛЬ МЕТОДОЛОГІЇ DEVOPS В ЕКОСИСТЕМАХ IOT....157
Пацьора А.А.
КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ІНФРАСТРУКТУРИ WEB 3.0 ПРИ ОПРАЦЮВАННІ ПРЕДМЕТНО-ОРІЄНТОВАНИХ СЦЕНАРІЇВ....165
Платов І.М., Павловська Ю.О.
ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ КРОКУЮЧОГО ГЕКСАПОДА ВІД ТРАЄКТОРІЇ РУХУ КІНЦІВОК В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ....172
Потрашкова Л.В., Пазюра К.С.
МЕТОДИКА ВИБОРУ ХАРАКТЕРИСТИК ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ ДЛЯ ВЕБСАЙТІВ, ПРИСВЯЧЕНИХ ОБРАЗОТВОРЧОМУ МИСТЕЦТВУ....181
Потрашкова Л.В., Коваленко В.І.
МЕТОДИКА РОЗРОБКИ ДИЗАЙНУ ВЕБСАЙТУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ УКРАЇНСЬКОГО ЕТНОСТИЛЮ....186
Прокопович-Ткаченко Д.І.
ГРАФІЧНА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ТА НЕЙРОМЕРЕЖЕВІ АЛГОРИТМИ: ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО МОНІТОРИНГУ СТАНІВ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ....192
Прокопович-Ткаченко Д.І., Саричев В.І., Звєрєв В.П., Бушков В.Г., Хрушков Б.С.
МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ ДЕРЖАВИ ЯК СКЛАДНОЇ ТЕХНОГЕННОЇ СИСТЕМИ: СТРАТЕГІЧНИЙ ПІДХІД ДО УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ....200
Рудницький П.Є.
МЕТОД СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ ЗАХИЩЕНОГО ЕЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБІГУ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ БЛОКЧЕЙН....209
Савула А.А., Коротинський А.П.
ЗАСТОСУВАННЯ ЗВУКОВИХ ОЗНАК ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІКО-ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО СТАНУ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ....215
Сагайда П.І., Костіков О.А.
АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МЕТОДУ ВЕРИФІКАЦІЇ ОНТОЛОГІЧНОЇ МОДЕЛІ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕОРІЇ КАТЕГОРІЙ ПІД ЧАС ПРОЕКТУВАННЯ СХОВИЩ ДАНИХ ТА ЗНАНЬ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ....221
Sazonov A.Yu., Ladieva L.R., Cherednychenko V.I.
ANALYSIS OF SOFTWARE-LEVEL OPTIMIZATION SOLUTIONS FOR MOBILE WALKING RESCUE ROBOT LOCOMOTION CONTROL SYSTEM....228
Fu Bin, Sarnatskyi V.V.
DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A SITUATIONAL AWARENESS SYSTEM BASED ON MULTI-SOURCE SECURITY LOG ANALYSIS....234
Цяпа С.М.
ЗАГРОЗИ ТА ВРАЗЛИВОСТІ КІБЕРБЕЗПЕКИ В МЕРЕЖЕВИХ ТА АВТОНОМНИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМАХ....244

ТРАНСПОРТ

Бойків М.В., Жеребецький Н.В.
ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ РУХУ НА ПЕРЕХРЕСТІ З ІНТЕНСИВНИМ ТРАНСПОРТНИМ ПОТОКОМ НА ГОЛОВНОМУ НАПРЯМКУ..... 251

Бойко С.М., Котов О.Б., Жуков О.А., Реута А.В., Журід В.І., Дерябіна І.О.
ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ В СИСТЕМИ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОБ'ЄКТІВ АЕРОДРОМНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ..... 259

Євчук Ю.Ю.
ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗМІНИ ЗАТРИМКИ РУХУ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ ЗА РІЗНИХ СПОСОБІВ ЙОГО ПРІОРИТИЗАЦІЇ..... 264

Карапиш А.С., Харченко О.І., Баркалова Н.О.
ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ ФОРМУВАННЯ ОЦІНОЧНИХ ПОКАЗНИКІВ СТІЙКОГО РОЗВИТКУ..... 272

Кравченко О.А., Луговой Т.А.
ОГЛЯД НОВІТНІХ ДЛЯ УКРАЇНИ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ СКОРОЧЕННЯ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ НА ЕКОЛОГІЮ ПІД ЧАС МОРСЬКОГО ПЕРЕВЕЗЕННЯ ВУГЛЕВОДНІВ..... 277

Петров Л.М., Кішянус І.В., Борисенко Т.М., Могилянець Т.М., Малиновський О.А., Шелухін С.В., Нікішин В.А.
ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ХОДОВОЇ ЧАСТИНИ АВТОМОБІЛЯ З ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ МІЖ ВЕДУЧИМИ МОСТАМИ..... 282

Фоменко Г.Р.
ВЕЛОТРАНСПОРТ І ЙОГО РОЗВИТОК У НАСЕЛЕНИХ ПУНКТАХ..... 288

Хітров І.О.
ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ АВТОБУСІВ ДЛЯ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ..... 293

ЕЛЕКТРОНІКА

Обухова Т.Ю., Зінченко А.Ю., Барбаш В.А., Душейко М.Г.
ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СТРУКТУР МЕЛАНІН-НАНОЦЕЛЮЛОЗА..... 299

АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ ТЕХНІЧНИХ НАУК

Мандрик Я.С.
ПРОВЕДЕННЯ АВІАЦІЙНОГО ПОШУКУ І РЯТУВАННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ..... 304

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ..... 309

CONTENTS

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND AUTOMATION

Batiuk S.G., Vasianovych V.M., Voroniuk M.V., Voroshylov A.I.
INVARIANT MODELS OF CONTROL OBJECTS AND UNIVERSAL STRUCTURES
OF PID-CONTROLLERS IN THE IMITATION MODELING OF THERMAL ENERGY SYSTEMS
OF AUTOMATIC REGULATION.....1

Berezhna O.B.
SYNERGY OF INFORMATION TECHNOLOGIES AND NEURAL NETWORKS
FOR TEXT CONTENT GENERATION.....13

Borovskova Ye.A.
DETERMINING OPTIMAL CACHING STRATEGIES FOR IMPROVING PERFORMANCE
OF SERVER APPLICATIONS ON NESTJS.....18

Garashchuk B.V.
A METHOD FOR OPTIMIZING IOT NETWORKS BASED ON BLOCKCHAIN
TECHNOLOGY USING A LIGHTENED CONSENSUS ALGORITHM 27

Hiorhizova-Hai V.S., Kyriusha B.A.
CLOUD SERVICES IN CORPORATE INFRASTRUCTURE.....32

Golubev L.P., Kiva I.L.
AN AUTOMATED SYSTEM FOR MONITORING ELECTRIC ENERGY CONSUMPTION
BY DEVICES BASED ON HOME ASSISTANT..... 40

Zvieriev V.P., Bushkov V.H.
CROSS-CHANNEL ANTI-FRAUD SYSTEMS AS A TOOL FOR COMPREHENSIVE
PROTECTION OF ELECTRONIC COMMUNICATIONS IN THE DIGITAL ECONOMY..... 46

Ivanyshyn V.V., Moshensky A.O.
ONTOLOGICAL STRUCTURE AND PARAMETERS OF THE APIARY CONTROL SYSTEM
MEASUREMENTS.....56

Ilchuk M.S.
A ROBUST BARCODE DETECTION SYSTEM WITH MACHINE LEARNING.....63

Caceres A., Globa L.S.
INTEGRATION OF AI AND MULTI-AGENT SYSTEMS
FOR MULTI-CRITERIA DECISION ANALYSIS IN MULTI-CLOUD ENVIRONMENTS..... 68

Kyrychenko Ye.O., Kyrychenko O.L.
BUILDING NEURAL NETWORK MODELS IN A CLOUD BY MEANS OF AWS EMR..... 75

Kozub V.V.
PRACTICE OF USING NEW TECHNOLOGIES IN MICROSERVICE ARCHITECTURE
OF SOFTWARE DEVELOPMENT.....80

Korotynskyi A.P., Abramova A.O., Skladannyy D.M.
DEVELOPMENT THE RECTIFICATION COLUMN MODEL IN THE ACETIC ACID
PRODUCTION AND ITS SIMPLIFICATION FOR CONTROL PROBLEMS.....89

Kurganov I.D., Kharlamenko V.Yu.
MODELING OF THE DRIVE DRUM OF A BELT CONVEYOR AS A CONTROL OBJECT
OF A SYSTEM WITH DISTRIBUTED PARAMETERS.....98

Lobanchykova N.M., Lysenko M.S.
ANALYSIS OF THE STATE OF PROVIDING VIRTUAL ACCOMPANIMENT IN HEALTHCARE
FACILITIES FOR LOW-MOBILITY POPULATION GROUPS.....104

Marchuk D.M., Fesiuk I.I., Rosa T.V., Karpin O.O., Maksymiuk T.A.
RESEARCH ON THE INFORMATIVENESS AND EXPLAINABILITY OF ARTIFICIAL
INTELLIGENCE ALGORITHMS.....112

Nadutenko M.V., Vasylenko O.D.
THE AGI-ALS CONCEPTION AND ITS METHODOLOGICAL FOUNDATIONS.....117

Nevliudov I.Sh., Yevsieiev V.V., Gurin D.V.
DEVELOPMENT OF A MODEL OF DYNAMIC DESCRIPTION OF THE ENVIRONMENT OF A COLLABORATIVE MANIPULATOR ROBOT WITHIN THE CONCEPT OF INDUSTRY 5.0.....128
Novak D.S., Moshenskyi A.O., Guida O.H., Ometsynska N.V., Dromenko V.B.
SATELLITE IMAGE SEGMENTATION SOFTWARE DEVELOPMENT.....134
Oleshchenko L.M.
SOFTWARE IMPLEMENTATION OF THE HUFF GRAVITY MODEL FOR OPTIMAL SPATIAL PLACEMENT OF URBAN SERVICE FACILITIES.....140
Oleshchenko L.M., Tarelkina K.O.
USER-DRIVEN VIDEO COLORIZATION SYSTEM DEVELOPMENT USING GENERATIVE ADVERSARIAL NEURAL NETWORK.....149
Orlov M.V., Hrybovskyi O.M., Zhovnir Yu.I., Duda O.M.
FROM CONCEPT TO REALITY: THE ROLE OF DEVOPS METHODOLOGY IN IOT ECOSYSTEMS.....157
Patsora A.A.
THE CONCEPTUAL MODEL OF REPRESENTING WEB 3.0 INFRASTRUCTURE IN THE PROCESSING OF A SUBJECT.....165
Platov I.M., Pavlovska Yu.O.
RESEARCH ON THE DEPENDENCE OF THE ENERGY CONSUMPTION OF A WALKING HEXAPOD ON THE TRAJECTORY OF LIMB MOTION UNDER CONDITIONS OF UNCERTAINTY.....172
Potrashkova L.V., Paziura K.S.
A METHODOLOGY FOR SELECTING AUGMENTED REALITY CHARACTERISTICS FOR WEBSITES DEDICATED TO THE VISUAL ARTS.....181
Potrashkova L.V., Kovalenko V.I.
METHODOLOGY FOR DEVELOPING A WEBSITE DESIGN USING UKRAINIAN ETHNICITY.....186
Prokopovych-Tkachenko D.I.
GRAPHICAL VISUALIZATION AND NEURAL NETWORKALGORITHMS: INNOVATIVE APPROACHES TO MONITORING THE STATES OF INFORMATION SYSTEMS.....192
Prokopovych-Tkachenko D.I., Sarychev V.I., Zvieriev V.P., Bushkov V.G., Khruskov B.S.
MODELING STATE INFORMATION SECURITY AS A COMPLEX TECHNOLOGICAL SYSTEM: A STRATEGIC APPROACH TO RISK MANAGEMENT.....200
Rudnitskiy P.Ye.
METHOD FOR CREATING A SECURE ELECTRONIC DOCUMENT MANAGEMENT SYSTEM BASED ON BLOCKCHAIN TECHNOLOGY.....209
Savula A.A., Korotynsky A.P.
APPLICATION OF SOUND FEATURE FOR MONITORING THE TECHNICAL AND OPERATIONAL CONDITION OF INDUSTRIAL EQUIPMENT 215
Sahaida P.I., Kostikov O.A.
ALGORITHMS FOR THE VERIFICATION METHOD OF THE ONTOLOGICAL MODEL USING CATEGORY THEORY DURING THE DESIGN OF DATA AND KNOWLEDGE WAREHOUSES OF INFORMATION SYSTEMS.....221
Sazonov A.Yu., Ladieva L.R., Cherednychenko V.I.
ANALYSIS OF SOFTWARE-LEVEL OPTIMIZATION SOLUTIONS FOR MOBILE WALKING RESCUE ROBOT LOCOMOTION CONTROL SYSTEM.....228
Fu Bin, Sarnatskyi V.V.
DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A SITUATIONAL AWARENESS SYSTEM BASED ON MULTI-SOURCE SECURITY LOG ANALYSIS.....234
Ciapa S.M.
CYBERSECURITY THREATS AND VULNERABILITIES IN CONNECTED AND AUTONOMOUS TRANSPORTATION SYSTEMS.....244

TRANSPORT

Boikiv M.V., Zherebetskyi N.V.
STUDY OF TRAFFIC CONDITIONS AT INTERSECTION
WITH A HEAVY TRAFFIC FLOW IN THE MAIN DIRECTION..... 251

Boiko S.M., Kotov O.B., Zhukov O.A., Reuta A.V., Zhurid V.I., Deryabina I.O.
PROSPECTS FOR IMPLEMENTING INTELLECTUALIZATION INTO ENERGY
SUPPLY SYSTEMS OF AIRPORT INFRASTRUCTURE FACILITIES..... 259

Yevchuk Yu.Yu.
PATTERNS OF CHANGES IN PUBLIC TRANSPORT DELAYS
IN DIFFERENT WAYS OF ITS PRIORITIZATION..... 264

Karapysh A.S., Kharchenko O.I., Barkalova N.O.
THEORETICAL FOUNDATIONS FOR FORMING SUSTAINABILITY INDICATORS..... 272

Kravchenko O.A., Lugovoy T.A.
OVERVIEW OF THE NEWEST INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR UKRAINE
TO REDUCE THE NEGATIVE IMPACT ON THE ENVIRONMENT DURING
SEA TRANSPORTATION OF HYDROCARBONS..... 277

Petrov L.M., Kishianus I.V., Borysenko T.M., Mohylianets T.M., Malynovskyi O.A., Shelukhin S.V., Nikishyn V.A.
STUDY OF THE DESIGN OF THE CAR CHASSIS
WITH AN ENERGY CONVERTER BETWEEN THE DRIVE AXLES..... 282

Fomenko H.R.
BICYCLE TRANSPORT AND ITS DEVELOPMENT IN URBAN CENTERS..... 288

Khitrov I.O.
APPLICATION OF ELECTRIC BUSES FOR PASSENGER TRANSPORTATION..... 293

ELECTRONICS

Obukhova T.Yu., Zinchenko A.Yu., Barbash V.A., Dusheiko M.G.
ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF MELANIN-NANOCELLULOSE STRUCTURES..... 299

CURRENT ISSUES OF TECHNICAL SCIENCES

Mandryk Ya.S.
CONDUCTING AERIAL SEARCH AND RESCUE USING UNMANNED AIRCRAFT..... 304

INFORMATION ABOUT AUTHORS..... 309

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 62-533.66
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/01

Батюк С.Г.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Васянович В.М.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Воронюк М.В.
Київський індустріальний фаховий коледж
Київського національного університету будівництва та архітектури

Ворошилов А.І.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ІНВАРІАНТНІ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТІВ УПРАВЛІННЯ І УНІВЕРСАЛЬНІ СТРУКТУРИ ПІД-РЕГУЛЯТОРІВ В ІМІТАЦІЙНОМУ МОДЕЛЮВАННІ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

Стаття присвячена імітаційному моделюванню сучасних теплоенергетичних систем автоматичного регулювання. Сучасні теплоенергетичні агрегати є складними технічними об'єктами, які вимагають високого рівня автоматизації для забезпечення стабільної та ефективної роботи. Операційна ефективність теплоенерегетичних систем автоматичного регулювання безпосередньо впливає на економічність, ефективність, продуктивність і надійність теплоенергетичних технологічних об'єктів управління. Імітаційне моделювання є важливим інструментом для аналізу, проєктування та оптимізації операційної ефективності теплоенерегетичних систем автоматичного регулювання.

У статті визначено, що важливими (навіть принциповими) є дві задачі структурного імітаційного моделювання: 1) моделювання об'єктів управління (або технологічного об'єкту управління як сукупності об'єктів управління) в системі комп'ютерної математики або в ПЛК; 2) реалізація універсальних структур ПІД-регуляторів в ПЛК. В статті викладені результати виконаних на кафедрі автоматизації енергетичних процесів досліджень саме з цих вказаних проблем.

Розроблена і досліджена модель універсального об'єкту управління для імітаційного функціонального і структурного моделювання теплоенергетичного технологічного об'єкту управління. Мета дослідження – розробка універсальної моделі об'єкту управління, яка є інваріантною (малочутливою) до параметричних збурень системи автоматичного регулювання, для моделювання теплоенергетичного технологічного об'єкту управління в типовій системі комп'ютерної математики і в типовому ПЛК.

Розроблені і досліджені універсальні структури ПІД-регуляторів для імітаційного функціонального і структурного моделювання теплоенерегетичного технологічного об'єкту управління. Мета дослідження: 1) розробка універсальної структури аналогового ПІД-регулятору з незалежними П-, І- і Д-частинами (ПІД-регулятор може бути редукований до ПД- та ІД-регулятору), який в комплекті з аналоговим виконавчим механізмом реалізує ПІД-закон регулювання; 2) розробка універсальної структури релейно-імпульсного ПІД-регулятору (ДПД2-регулятору з часо-імпульсною

модуляцією), який в комплекті з трипозиційним виконавчим механізмом реалізує аналоговий ПІД-закон регулювання.

Ключові слова: *теплова енергетика, технологічний об'єкт управління, кібер-фізична система, автоматизована система управління, система автоматичного регулюваннння, інформаційно-вимірювальна система, система програмно-логічного управління, автоматизація технологічних процесів, програмно-технічні засоби автоматизації, контролерна функціональність, супервізорна функціональність, ПІД-регулятор, цифровий двійник, граничний девайс, інтернет речей, імітаційне моделювання, функціональне моделювання, структурне моделювання.*

Постановка проблеми. Сучасні теплоенергетичні агрегати є складними технічними об'єктами, які вимагають високого рівня автоматизації для забезпечення стабільної та ефективної роботи.

Теплоенергетичний технологічний об'єкт управління (ТОУ) – технологічний агрегат (піч, котел, інженерна система життєзабезпечення будівлі тощо), який автоматизується. АСУТП (або просто АСУ) – автоматизована система управління технологічними процесами. Автоматизований технологічний комплекс (АТК) – ТОУ, керований АСУ. ТОУ – коплекс ОУ (каналів передачі дії «зміна регулювальної дії – зміна регульованого параметру»). АСУ – комплекс автоматичних систем регулювання (АСР). АТК – комплекс САР режимних параметрів. АТК – кібер-фізична система (КФС). Теплоенергетична САР – САР режимного параметру теплоенергетичного ОУ. Теплоенергетичні ОУ в складі теплоенергетичного ТОУ – це «повільні» і «дуже повільні» ОУ (аперіодичні ланки високого порядку; бак з рідиною – інтегральна ланка). Сучасні автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУТП; надалі просто АСУТП або АСУ) ТОУ є дворівневими. Програмно-технічною платформою контролерного (нижнього) рівня АСУ є програмовані логічні контролери (ПЛК). Бізнес-логіка (неперервне регулювання і програмно-логічне управління) в ПЛК реалізується функціональними блоками (ФБ). Програмно-технічною платформою супервізорного (верхнього) рівня АСУ є HMI/SCADA-системи (надалі системи ЛМІ – людинно-машинного інтерфейсу). Візуалізація в ЛМІ реалізується графічними вікнами з вставленими і анімованими графічними елементами і контролами (меню, мнемосхеми, аларми, тренди, рецепти, розклади, звіти тощо). Сучасна АСУ (як сукупність АСР) функціонально структурується на дві підсистеми: інформаційно-вимірювальну систему (ІВС) і регулювально-виконавчу систему (РВС). ІВС – сукупність вимірювальних каналів (ВК) технологічних параметрів (сенсори або давачі Д; реєструючі прилади РП; вхідні модулі ПЛК). РВС – сукупність регулювально-виконавчих каналів (РВК) технологічних параметрів (ФБ в ПЛК; вихідні модулі ПЛК; актуатори або виконавчі механізми ВМ; блоки ручного управління БРУ для вибору режимів автоматичного (від ПЛК) або ручного і дистанційного управління з пульта оператору ВМ в ручному режимі; регулюючі органи РО). Програмно-технічні комплекси засобів автоматизації (ПТК) АСР – сукупність ВК і РВК в складі АСР (коректно буде також сказати – в складі САР). Сучасні ПТК є трирівневі: нижній рівень автоматизації – контролерний рівень; на супервізорному рівні виділяються програмні серверний і клієнтський рівні автоматизації.

Операційна ефективність теплоенерегетичних САР безпосередньо впливає на економічність, ефективність, продуктивність і надійність теплоенергетичних ТОУ.

Імітаційне моделювання є важливим інструментом для аналізу, проєктування та оптимізації операційної ефективності теплоенерегетичних САР.

Імітаційне моделювання – це програмне (не фізичне і не математичне) моделювання (імітація) фізичних (реальних) активів. Ефективність імітаційного моделювання визначається можливістю реалізувати налагодження і випробування промислової САР в робочих умовх ще до інсталяції розробленої системи автоматизації на майданчику замовника; тобто, фактично, на стадії робочого проєктування перед впровадженням і потім на стадії модернізації перед тиражуванням. Таку можливість випробування розробленої системи автоматизації в робочих умовах дає моделювання реального технологічного процесу в системі комп'ютерної математики і використання змодельованого технологічного процесу замість реального фізичного технологічного процесу. Розробник системи автоматизації може перевірити і налагодити контролерну і супервізону функціональності системи автоматизації ще до інсталяції її на майданчику замовника – на розробленій комп'ютерній моделі технологічного процесу. Реалізація такого структурного моделювання потребує вирішення певних програмно-технічних задач (обмін даними Модель – ПЛК – HMI/SCADA-система) і певних задач в моделюванні

технологічного процесу в системі коп'ютерної математики (правильна апроксимація динаміки технологічних процесів). Функціональне імітаційне моделювання динамічної системи імітує функції, які вона виконує, тоді як структурне імітаційне моделювання імітує взаємодію між різними структурними компонентами системи. Імітаційне моделювання АТК є ефективним інструментом для перевірки працездатності та налаштування АСУ, особливо в ситуаціях, коли відсутній доступ до реальних фізичних ТОУ, і неможливо провести аналіз динаміки систем автоматичного регулювання з використанням складних математичних моделей. Це моделювання застосовується на етапах проектування (розробки та програмування), впровадження, серійного виробництва та модернізації АСУ. Моделювання ТОУ може здійснюватися або в системі комп'ютерної математики (СКМ), або безпосередньо в ПЛК. Людино-машинний інтерфейс (ЛМІ) реалізується через зовнішню SCADA-систему або HMI-панель, інтегровану в сам ПЛК. ПЛК може бути як апаратним (хардПЛК), так і програмним (софтПЛК), що реалізується на комп'ютері.

Вирізняють:

1. імітаційне SIL-моделювання АТК (Software-In-the-Loop: софтПЛК в колі зворотного зв'язку; модель ТОУ реалізована в СКМ; ЛМІ – зовнішня SCADA-система);

2. імітаційне HIL-моделювання АТК (HardwareIn-the-Loop: хардПЛК в колі зворотного зв'язку; модель ТОУ реалізована прямо в хардПЛК; ЛМІ – HMI-панель самого хардПЛК);

3. імітаційне VIL-моделювання АТК (Viewer-In-the-Loop: модель ТОУ, ПЛК і ЛМІ реалізовані в HMI/SCADA-системі).

Функціональне імітаційне моделювання – моделювання функціональності замкнених САР в СКМ Matlab Simulink.

Структурне імітаційне моделювання – моделювання структурних компонентів АСУТП на полігоні імітаційного SIL-моделювання на платформі СКМ – софтПЛК або хардПЛК – HMI/SCADA-система.

Важливими (навіть принциповими) є дві задачі структурного імітаційного моделювання: 1) моделювання ОУ (або ТОУ як сукупності ОУ) в СКМ або в ПЛК; 2) реалізація універсальних структур ПІД-регуляторів в ПЛК. Актуальними є розробки і дослідження саме з цих вказаних проблем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Актуальність публікацій з тематики статті може бути визначена за наступними напрямками:

1. Імітаційне функціональне і структурне моделювання активно практикується для створення дослідницьких полігонів, програмно-технічних симуляторів і тренажерів, в тому числі і спеціалістами провідних вишів України.

Розроблений на кафедрі автоматизації енергетичних процесів (АЕП) НТУУ КПІ полігон імітаційного моделювання дає можливість реалізувати функціональне імітаційне моделювання (моделювання функцій і перехідних процесів замкнених САР) і структурне ім ітаційне моделювання (взаємодію контролерн ої і супервізорної функціональностей, реалізованих реальними ПЛК і HMI/SCADA-системами, з технологічним процесом, змодельованим в СКМ) теплоенерегетичних САР. Полігоні SIL-моделювання розроблений на платформі СКМ Matlab Simulink – софтПЛК CoDeSys – HMI/SCADA-система WebStudio. Результати робіт, висновки і рекомендації із застосування розроблених рішень викладені в монографії [1].

2. Питання адекватності моделі ОУ реальному ОУ і малочутливості (інваріантності) моделі ОУ до параметричних збурень САР (добовий, сезонний і віковий дрейфи параметрів ОУ) є актуальними для задач синтезу (в тому числі з використанням методів імітаційного моделювання) адаптивних САР з еталонними моделями ОУ [2].

3. Питання реалізації в СКМ і в ПЛК універсальної структури аналогового ПІД-регулятору (який може бути редукований до П-, І- і Д-регуляторів) і універсальної структури релейно-імпульсного ДПД^2-регулятору з часо-імпульсною модуляцією (який, в комплекті з трипозиційним ВМ – інтегратором – реалізує аналоговий ПІД-закон регулювання), питання розрахунку налагоджень ПІД-регулятору і адаптації параметрів ПІД-регулятору до параметричних збурень САР (добовий, сезонний і віковий дрейфи параметрів ОУ) є актуальними для задач синтезу адаптивних САР [3].

При імітаційному моделюванні промислових САР виникають наступні питання:

1. Чи адекватно (коректно і достатньо) апроксимувати теплоенергетичний ОУ (ОУ з великим перехідним запізненням) послідовним з'єднанням аперіодичної ланки 1-го або 2-го порядку і ланки транспортного запізнення (тобто, апроксимувати перехідне запізнення теплоенерегетичного ОУ транспортним запізненням, якого в теплоенергетичному ОУ ніколи немає)?

2. Що таке взагалі «адекватна» модель теплоенергетичного ОУ (тобто, що таке «адекватна» апроксимація перехідного запізнення теплоенер-

гетичного ОУ транспортним запізненням, якого в теплоенергетичному ОУ ніколи немає)?

3. Як моделювати замкнену теплоенергетичну САР – обов'язково з «реальною» моделлю ОУ (яка реально адекватна ОУ) чи можна з «нереальною» («неадекватною») апроксимованою моделлю ОУ (в якій перехідне запізнення апроксимується транспортним запізненням)?

4. Як реалізувати в ПЛК ПІД-регулятор (ПІ-закон є оптимальним для типового статичного ОУ), який, за необхідності, може бути редукований до П-регулятору (який є оптимальним для астатичного ОУ) або до І-регулятору (який є оптимальним для статичного ОУ з великим перехідним запізненням)?

5. Як реалізувати в ПЛК ФБ ДПД^2-закону регулювання, який в комплекті з трипозиційним ВМ (який апроксимується інтегратором) реалізує ПІД-закон регулювання?

Постановка завдання.

1. Розробити і дослідити модель універсального ОУ для імітаційного функціонального і структурного моделювання теплоенергетичного ТОУ. Мета дослідження – розробка універсальної моделі ОУ, яка є інваріантною (малочутливою) до параметричних збурень САР, для моделювання теплоенергетичного ТОУ в типовій СКМ і в типовому ПЛК.

2. Розробити і дослідити універсальні структури ПІД-регуляторів для імітаційного функціонального і структурного моделювання теплоенерегетичного ТОУ. Мета дослідження: 1) розробка універсальної структури аналогового ПІД-регулятору з незалежними П-, І- і Д-частинами (ПІД-регулятор може бути редукований до ПД- та ІД-регулятору), який в комплекті з аналоговим ВМ реалізує ПІД-закон регулювання; 2) розробка універсальної структури релейно-імпульсного ПІД-регулятору (ДПД^2-регулятору з часо-імпульсною модуляцією), який в комплекті з трипозиційним ВМ реалізує аналоговий ПІД-закон регулювання.

Виклад основного матеріалу.

Моделювання і дослідження

В імітаційному моделюванні використовуються лінійні ОУ, лінійні регулятори і, відповідно, лінійні САР.

Лінійні ОУ/САР – це ОУ/САР, для яких виконується принцип суперпозиції. Принцип суперпозиції – реакція ОУ/САР на сигнальне збурення є сумою реакцій ОУ/САР на елементарні типові збурення, сумою яких є це сигнальне збурення (на які це сигнальне збурення може бути розкладене). Практично це означає, що параметри ОУ/САР не залежать від амплітуд регулювальної дії, збурень і регульованого параметру (і його похідних). Найважливіший принцип, так як він теоретично і практично забезпечує відтворюваність результатів розрахунку, моделювання і налагодження в практичній реалізації (незалежність якості перехідних процесів від амплітуд регулювальної дії і збурень – час перехідних процесів завжди однаковий, амплітуди коливань перехідних процесів еквідестантні). Промислово роботоздатні тільки лінійні САР. Основним реулятором лінійної САР є класичний ПІД-регулятор, який є оптимальним регулятором для лінійних ОУ.

Нелінійні САР (нелінійні диференціальні або різницеві рівняння; параметри ОУ залежать від амплітуд регулюючої дії, збурень і регульованого параметру і його похідних) промислово нероботоздатні, так як результати розрахунку, моделювання і налагодження не є відтворюваними в практичній реалізації (залежність якості перехідних процесів від амплітуд регулювальної дії і збурень – час перехідних процесів завжди різний, амплітуди коливань перехідних процесів нееквідестантні). Єдиний виняток – одноконтурна САР з двопозиційним релейним регулятором. В такій САР сталим режимом роботи є автоколивання (негармонійні і несинусоїдальні коливання), амлітуда і період яких можуть змінюватись, але ніколи не може бути перехідного процесу, що розходиться.

В промисловості практично використовуються виключно лінійні САР з ПІД-регуляторами. В промисловості релейні САР використовуються тільки тоді, коли АТК має багато САР і дешевше реалізувати релейні САР, ніж лінійні з ПІД-регуляторами (економія на сенсорах, актуаторах і кваліфікованих програмістах ПЛК і кваліфікованих налагоджувачах САР).

Принциповим є розмежування понять ТОУ і ОУ. ТОУ – це технологічний агрегат (піч, котел, інженерна система життєзабезпечення). ОУ – це канал передачі регулювальної дії на регульований параметр (канал «зміна регулювальної дії – зміна регульованого режимного параметру»). ТОУ – це сукупність ОУ. ТОУ – різні, але ОУ – типові, що і робить автоматизацію типовою, а не кожний раз для нового ТОУ унікальною.

Всі типові ОУ підрозділяються на статичні і астатичні. Статичний ОУ (ОУ з самовирівнюванням) – це ОУ, регульований параметр якого, при стрибкоподібному збуренні зі сторони РО, виходить на нове постійне значення. Астатичний ОУ (ОУ без самовирівнювання) – це ОУ, регульований параметр якого, при стрибкоподібному збуренні зі

сторони РО, неперервно рівномірно змінюються і ніколи не виходить на нове постійне значення.

На рисунках 1–4 наведені структура статичного ОУ, стрибкоподібне збурення зі сторони ОУ, крива розгону ОУ і апроксимована перехідна характеристика статичного ОУ.

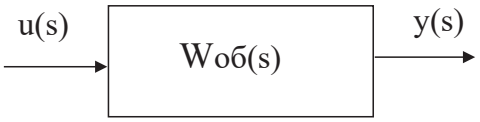


Рис. 1. Структура статичного ОУ

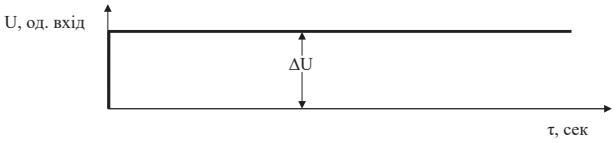


Рис. 2. Стрибкоподібне збурення для ОУ зі сторони РО

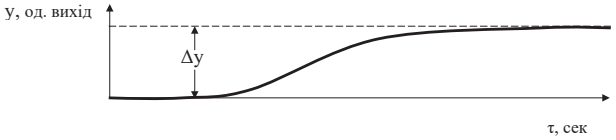


Рис. 3. Крива розгону статичного ОУ

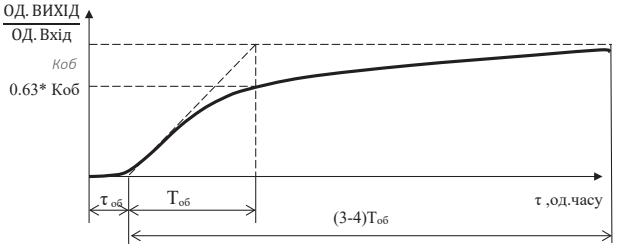


Рис. 4. Апроксимована перехідна характеристика статичного ОУ

Коефіцієнт передачі статичного ОУ розраховується за формулою (1).

$$K_{об} = \frac{\Delta y}{\Delta u}, \qquad (1)$$

де $K_{об}$ – коефіцієнт передачі ОУ, $\frac{од.\ вихід}{од.\ вхід}$;

Δy – зміна вихідного сигналу, од. вихід;

Δu – зміна вхідного сигналу, од. вхід.

Якщо $0 \le \tau \le \tau_{об}$, то $h(\tau) = 0$, якщо $\tau > \tau$ об, то апроксимована перехідна характеристика статичного ОУ розраховується за формулою (2). В свою чергу, апроксимована передавальна функція статичного ОУ розраховується за формулою (3).

$$h(\tau) = K_{об} * \left(1 - e^{-\frac{\tau - \tau_{об}}{T_{об}}}\right), \qquad (2)$$

$$W_{об}(s) = e^{-\tau_{об} * s} * \frac{K_{об}}{T_{об} * s + 1}, \qquad (3)$$

де s – символ перетворення Лапласа (оператор диференціювання);

$h(\tau)$ – перехідна функція, $\frac{од.\ вихід}{од.\ вхід}$;

$K_{об}$ – коефіцієнт передачі ОУ, $\frac{од.\ вихід}{од.\ вхід}$;

τ – час, сек;

$\tau_{об}$ – час транспортного запізнення, сек;

$T_{об}$ – стала часу (час диференціювання), сек;

$W_{об}$ – передавальна функція ОУ (оператор ОУ).

На рисунках 5–8 наведені структура астатичного ОУ, стрибкоподібне збурення зі сторони ОУ, крива розгону астатичного ОУ і апроксимована перехідна характеристика астатичного ОУ.

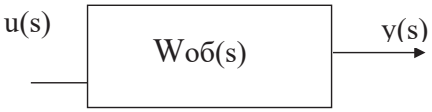


Рис. 5. Структура астатичного ОУ

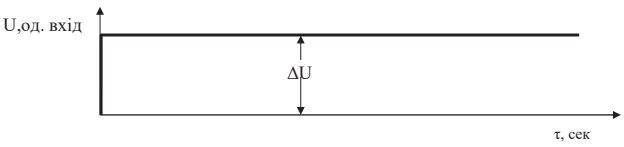


Рис. 6. Стрибкоподібне збурення для астатичного ОУ

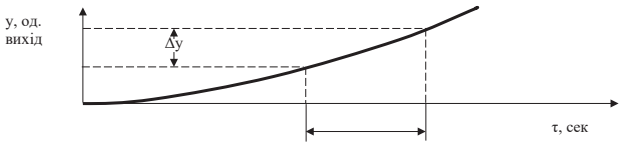


Рис. 7. Крива розгону астатичного ОУ

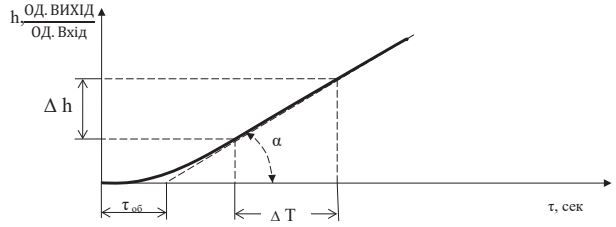


Рис. 8. Апроксимована перехідна характеристика астатичного ОУ

Зміна відгуку астатичного ОУ розраховується за формулою (4). Швидкість зміни відгуку астатичного ОУ розраховується за формулою (5).

$$\Delta h = \frac{\Delta y}{\Delta u}, \qquad (4)$$

$$E_{об} = \frac{\Delta h}{\Delta \tau} = \frac{\Delta y}{\Delta u * \Delta \tau}, \qquad (5)$$

де Δh – зміна відгуку, $\frac{од.\ вихід}{од.\ вхід}$;

Δy – зміна вихідного сигналу, *од. вихід*;

Δu – зміна вхідного сигналу, *од. вхід*;

$E_{об}$ – швидкість зміни відгуку, $\frac{од.\ вихід}{од.\ вхід * сек}$;

$\Delta\tau$ – зміна часу, сек.

Якщо $0 \le \tau \le \tau_{об}$, то $h(\tau) = 0$, якщо $\tau > \tau$ об, то апроксимована перехідна характеристика астатичного ОУ розраховується за формулою (6). В свою чергу, апроксимована передавальна функція астатичного ОУ розраховується за формулою (7).

$$h(\tau) = E_{об} * (\tau - \tau_{об}), \quad (6)$$

$$W_{об}(s) = e^{-\tau_{об} * s} * E_{об} * \frac{1}{s}, \quad (7)$$

де $h(\tau)$ – перехідна функція, $\frac{од.\ вихід}{од.\ вхід}$;

$E_{об}$ – швидкість зміни відгуку, $\frac{од.\ вихід}{од.\ вхід * сек}$;

τ – час, сек;

$\tau_{об}$ – час транспортного запізнення, сек;

$W_{об}$ – передавальна функція об'єкту (оператор об'єкту);

s – символ перетворення Лапласа (оператор диференціювання).

Передавальна функція ПІ-регулятору розраховується за формулою (8).

$$W_{об}(s) = K_p\left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) = K_p \frac{T_i s + 1}{T_i s}, \quad (8)$$

де $W_{об}$ – передавальна функція об'єкту (оператор об'єкту);

s – символ перетворення Лапласа (оператор диференціювання);

K_p – коефіцієнт передачі регулятору, $\frac{од.\ вхід}{од.\ вихід}$;

T_i – стала часу інтегрування, сек.

Збурення зміною розбалансу на вході ПІ-регулятору, крива розгону і перехідна характеристика ПІ-регулятору наведені на рисунках 9–10.

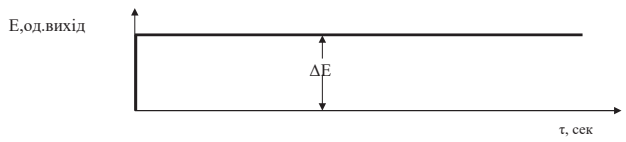


Рис. 9. Стрибкоподібне збурення зміною розбалансу на вході ПІ-регулятору

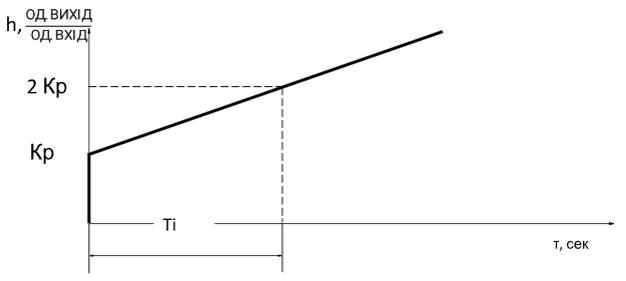


Рис. 10. Перехідна характеристика ПІ-регулятору

Рисунки 1–8 і формули (1–7) демонструють, що практично використовувані промислові статичні ОУ (ОУ з самовирівнюванням) з перехідним (ємнісним) запізненням апроксимуються послідовним з'єднанням аперіодичної ланки 1-го порядку і ланки транспортного запізнення (замість перехідного запізнення), а астатичні ОУ (ОУ без самовирівнювання) з перехідним (ємнісним) запізненням апроксимуються послідовним з'єднанням інтегральної ланки і ланки транспортного запізнення (замість перехідного запізнення).

Оптимальним регулятором для статичного ОУ, апроксимованого послідовним з'єднанням аперіодичної ланки 1-го порядку і ланки транспортного запізнення, буде ПІ-регулятор. Оптимальним регулятором для статичного ОУ, апроксимованого послідовним з'єднанням аперіодичної ланки 2-го порядку (двома послідовно з'єднаними аперіодичними ланками 1-го порядку) і ланки транспортного запізнення, буде ПІД-регулятор. Оптимальним регулятором для статичного ОУ з великим перехідним запізненням (тобто з великим апрксимованим транспортним запізненням) є І-регулятор.

Оптимальним регулятором для астатичного ОУ, апроксимованого послідовним з'єднанням інтегральної ланки і ланки транспортного запізнення, буде П-регулятор. Використання П-регулятору для статичного ОУ неефективне, так як замкнена САР не забезпечує нульову статичну похибку регулювання (в кінці перехідного процесу регульований параметр ніколи не виходить на задане значення). Використання ПІ-регулятору (або ПІД) для астатичного ОУ можливе, але забезпечує гірший перехідний процес і може призводити до значних перерегулювання і часу регулювання в перехідному процесі в замкненій САР. Використання І-регулятору для астатичного ОУ неможливе, так як замкнена САР в цьому випадку є структурно несталою, тобто такою, в якій не може бути реалізований перехідний процес, що сходиться до заданого значення регульованого параметру; такий процес не може бути реалізований при будь яких параметрах астатичного ОУ і при будь-яких налагодженняж І-регулятору (причина цього полягає в тому, що в розімкненій САР послідовно з'єднані дві інтегральні ланки – сам астатичний ОУ і сам І-регулятор).

Формула (8) і рисунки 9-10 демонструють, що практично використовуваний ПІ-регулятор (частіше використовують замість ПІД-регулятору просто ПІ-регулятор без Д-частини, так як Д-частина «підкреслює» високочастотні перешкоди, погір-

шуючи перехідний процес в замкненій САР) є паралельним з'єднанням П-, І- і Д-частин, але зі спільним коефіцієнтом передачі регулятора. Така структура ПІ-регулятору унеможливлює редукцію ПІ-закону до П-закону (який є оптимальним законом регулювання для астатичних ОУ) або до І-закону (який є оптимальним для статичних ОУ з великим перехідним запізненням, тобто з великим апроксимованим транспортним запізненням).

Так звані «теплоенергетичні» ОУ – це «повільні» ОУ, тобто це ОУ з великими перехідними запізненнями (наслідок процесів тепломасообміну в «теплоенергетичних» ТОУ); в той же час такі ОУ практично не мають транспортного запізнення.

ПІД-закон регулювання реалізується не тільки ФБ ПІД-регулятору в ПЛК, а комплектом «ФБ в ПЛК – ВМ». Використовуються два типи ВМ – аналоговий (керується одним аналоговим сигналом 0-10 В з ПЛК; цей сигнал з ПЛК є заданним значенням положення РО; аналоговий ВМ є повторювачем, тобто пропорційною одиничною ланкою) і трипозиційний (керується двома дискретними командами БІЛЬШЕ і МЕНШЕ 0–24 В; ці команди переміщують ВМ і РО відповідно в напрямку ВІДКРИТИ і ЗАКРИТИ; трипозиційний ВМ є інтегратором, тобто інтегруючою ланкою). Для аналогвого ВМ – ФБ в ПЛК має реалізовувати дійсно ПІД-закон регулювання (тоді комплект ФБ-ВМ реалізує саме ПІД-закон регулювання). Для трипозиційного ВМ – ФБ в ПЛК має реалізовувати ДПД^2-закон регулювання, який трипозиційний ВМ як інтегратор «інтегрує» в ПІД-закон регулювання (тоді комплект ФБ-ВМ реалізує саме ПІІД-закон регулювання).

Всі моделі ОУ і ПІДзегуляторів, які розглядаються далі в статті, розроблені в середовищі СКМ Matlab Simulink.

Будь-який теплоенергетичний ТОУ можна представити як структуру з таких технологічних елементів: 1) вентиль; 2) труба; 3) відкритий бак; 4) закритий бак (ресивер).

На рис. 11 наведені елементарні ланки вказаних технологічних елементів (моделі елементарних промислових ОУ).

Елементарні теплоенергетичні ОУ представлені як: 1) вентиль – пропорційна ланка; 2) труба – ланка транспортного запізнення; 3) відкритий бак – інтегруюча ланка; 4) закритий бак (ресивер) – інтегратор (відкритий бак) з одиничним зворотним зв'язком (закрита кришка, яка «створює» зворотний зв'язок), тобто аперіодична ланка 1-го порядку.

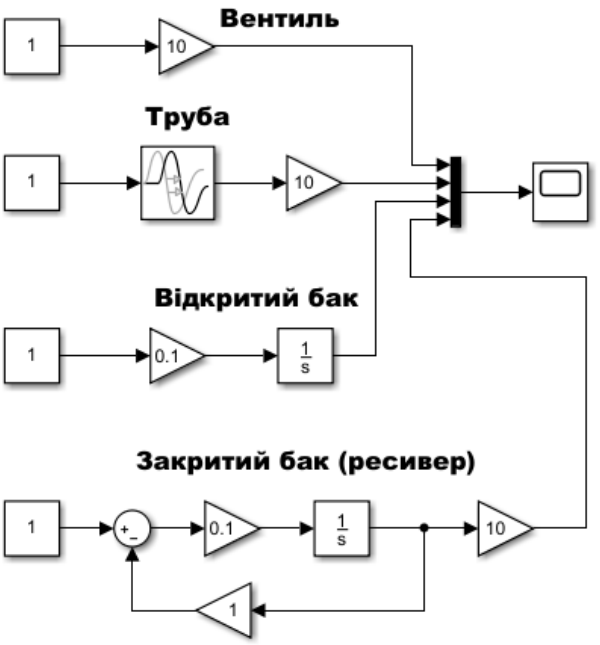


Рис. 11. Моделі елементарних промислових ОУ в СКМ Matlab Simulink

На рис. 12 наведена модель універсального ОУ В СКМ. Каскадна САР для моделювання є найкращою САР (бо є САР з додатковим інформаційним каналом, так як реалізує принцип регулювання з проміжної точки ОУ) і універсальною САР (так як може бути переконфігурована в одноконтурну САР). Реальна модель універсального теплоенергетичного ОУ в імітаційному моделюванні каскадної САР реалізована у вигляді послідовного з'єднання: для моделі ОУ в СКМ – 4-х аперіодичних ланок 1-го порядку (дві перші ланки – швидкісний ОУ; дві останні ланки – інерційний ОУ); для моделі ОУ в ПЛК – 2-х аперіодичних ланок 1-го порядку (перша ланка – швидкісний ОУ; друга ланка – інерційний ОУ). Змодельовані збурення зі сторони РО і перешкоди, накладені на датчик основного регульованого параметру.

Рекомендації з використання регуляторів в замкненій САР:

– ОУ з самовирівнюванням (статичний ОУ – вихід ОУ плавно переходить на нове стале значення при збуренні зі сторони входу ОУ). Приклад ОУ: канал передачі дії «зміна витрати води через батарею – зміна температури повітря в кімнаті». 1) Принципово не використовувати П-регулятор, так як він не забезпечує нульову статичну похибку в кінці перехідного процесу. 2) Принципово потрібно використовувати І-регулятор, так як він забезпечує нульову статичну похибку в кінці перехідного процесу. 3) Рекомендується використовувати ПІ-регулятор як найкращий регуля-

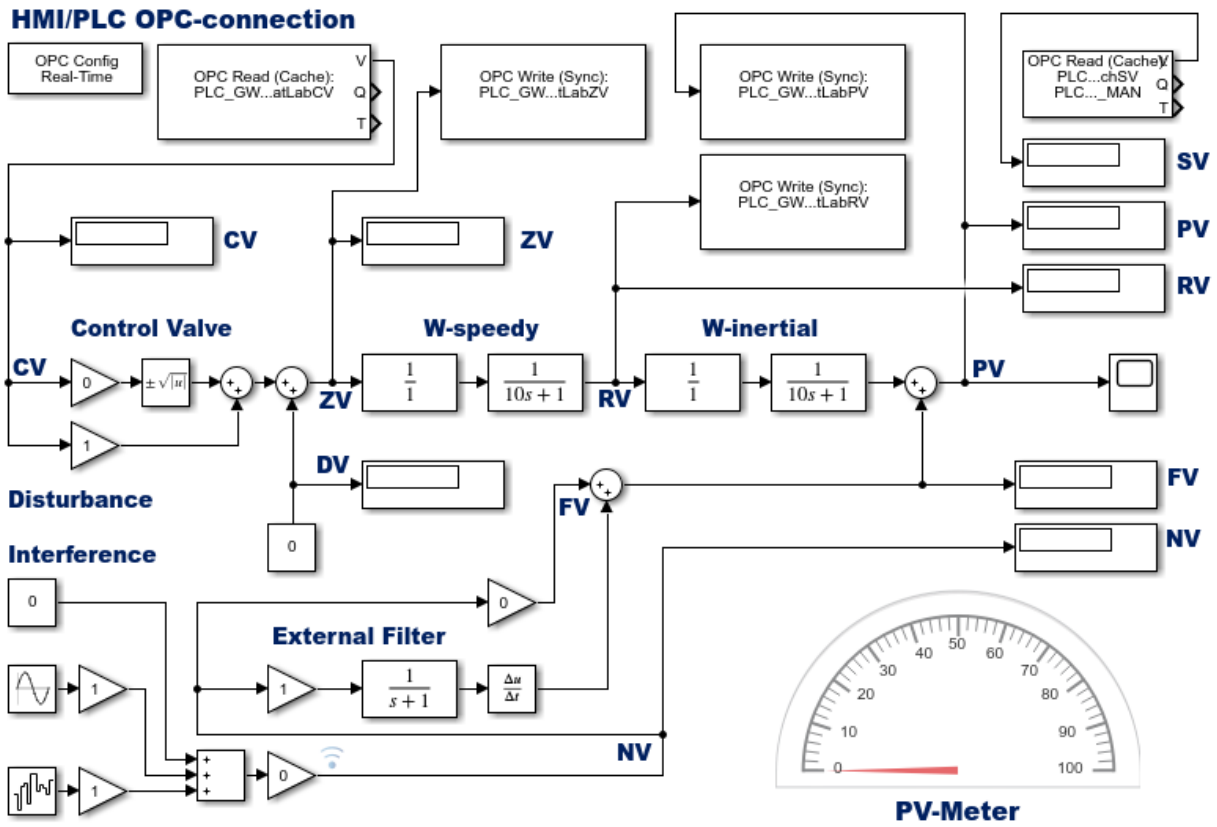


Рис. 12. Модель універсального ОУ в СКМ Matlab Simulink

тор для статичного ОУ, так як повільна І-частина забезпечує нульову статичну похибку, а швидка П-частина забезпечує швидше якісне регулювання (відносно нетривалий малоколивальний перехідний процес).

– ОУ без самовирівнювання (астатичний ОУ – вихід ОУ неперервно змінюється при збуренні зі сторони входу ОУ і не переходить на нове стале значення). Приклад ОУ: канал передачі дії «матеріальний небаланс – зміна рівня води в баці». 1) Принципово не використовувати І-регулятор, так як САР з двома послідовно включеними інтеграторами є структурно несталою (САР є або на межі сталості – синусоїдальні коливання однакової амплітуди; або САР є несталою – перехідний процес, що розходиться – амплітуда кожного напівперіоду коливань більша за попередню), тобто в ній ніякими налагодженнями регулятору не можна забезпечити сталість САР (перехідний процес, що сходиться – амплітуда кожного напівперіоду коливань менша за попередню). 2) Можна використовувати П-регулятор, так як він забезпечує нульову статичну похибку в кінці перехідного процесу для збурення завданням і малу ненульову для збурення зі сторони РО. П-регулятор рекомендується як безпечний регулятор для астатичного ОУ. 3) Можна використовувати ПІ-регулятор. Він завжди забезпечує нульову статичну похибку, але І-частина призводить до повільнішого регулювання (відносно тривалий коливальний перехідний процес).

На рис. 13 представлені моделі в СКМ двох структур ПІД-регулятору – з загальним коефіцієнтом передачі та з незалежними коефіцієнтами для П-, І- та Д-частини. Перевагою структури з загальним коефіцієнтом передачі є те, що в стандартних розрахунках розраховується загальний коефіцієнт передачі (Kp), стала часу інтегрування (Ti) та стала часу диференціювання (Td). Недоліком структури з загальним коефіцієнтом передачі є те, що не можна отримати П- та І-регулятор шляхом обнулення коефіцієнтів. Перевагою структури з незалежними коефіцієнтами є той факт, що шляхом обнуленням коефіцієнтів можна отримати будь-який регулятор, в тому числі П- та І-регулятори (тому саме в цьому сенсі така структура ПІД-регулятору є універсальною). Недоліком структури з незалежними коефіцієнтами є те, що розраховані параметри Kp, Ti Td треба перераховувати в коефіцієнти для П-, І- та Д-частин (але це робиться дуже легко). Структура ПІД-регулятору з незалежними коефіцієнтами П-, І- і Д-частин стає всі більш популярною і вживаною в ПЛК.

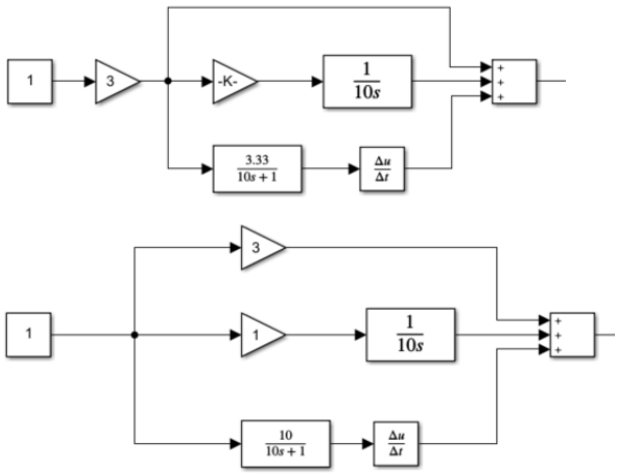


Рис. 13. Модель аналогового регулятору в СКМ Matlab Simulink. А – із загальним коефіцієнтом передачі. Б – з незалежними коефіцієнтами для П-, І- та Д-частин

Наведені на рис. 13 структури ПІД-регуляторів реалізуються у вигляді ФБ в ПЛК і використовуються з ВМ змінної швидкості (аналоговими ВМ). Аналоговий ВМ є позиціонером, тобто пропорційною ланкою з одиничним коефіцієнтом передачі.

На рис. 14 представлена модель релейно-імпульсного ПІД-регулятору (для спрощення моделі використаний ПІ-регулятор замість ПІД-регулятору), який фактично є ДПД^2-регулятором і в комплекті з ВМ постійної швидкості (трипозиційним ВМ) формує ПІД-закон регулювання (трипозиційний ВМ є інтегратором та «інтегрує» ДПД^2-закон в ПІД-закон).

Трипозиційний ВМ змодельований двома інтеграторами (один в сторону БІЛЬШЕ і другий в сторону МЕНШЕ). ФБ ПДД^2-регулятору фактично змодельований як послідовне з'єднання ПІД-регулятору і диференціальної ланки. Диференціальна ланка змодельована як два двопозиційних реле (в сторони БІЛЬШЕ і МЕНШЕ), охоплені зворотним зв'язком через інтегратори, які імітують трипозиційні ВМ. Фізично вказана диференціальна ланка є часо-імпульсним модулятором (ЧІМ). Використання ЧІМ в комплекті з універсальною структурою ПІД-регулятору дозволяє отримати універсальну структуру ДПД^2-регулятору.

Переважна більшість теплоенергетичних ОУ є статичними ОУ (єдиний астатичний ОУ – «зміна матеріального балансу – рівень води в баку»). Практично ефективною апроксимацією статичного ОУ є апроксимація ОУ послідовним з'єднанням аперіодичної ланки 1-го порядку і ланки транспортного запізнення.

Проблема швидкого і в той же час точного розрахунку налагоджень ПІД-регулятору є актуальною задачею автоматичного регулювання. Для одноконтурних і каскадних САР найлегшим і дуже ефективним способом розрахунку налагоджень ПІД-регулятору є так званий експрес-метод (інженерний метод розрахунку), який і був використаний в імітаційному моделюванні теплоенергетичних ОУ.

Експрес-розрахунок ПІ-регулятору для статичного ОУ наведений в формулі (9).

$$Kp = k_1 * \frac{1}{K_{об}} * \frac{T_{об}}{\tau_{об}}, \quad T_i = k_2 * T_{об}, \qquad (9)$$

де K_p – коефіцієнт передачі ПІД-регулятору, $\frac{од.\ вхід}{од.\ вихід}$;

T_i – стала часу інтегрування ПІД-регулятору, сек.

$K_{об}$ – коефіцієнт передачі ОУ, $\frac{од.\ вихід}{од.\ вхід}$;

$\tau_{об}$ – стала часу транспортного запізнення ОУ, сек;

$T_{об}$ – стала часу аперіодичної ланки ОУ, сек;

k_1, k_2 – безрозмірні нормуючі коефіцієнти, які формують заданий тип перехідного процесу в замкненій САР (аперіодичний; з 20%-им перерегулюванням; з мінімумом квадратичного інтегрального критерію).

Адекватність апроксимованої моделі теплоенергетичного ОУ має розумітись і реалізовуватись в сенсі забезпечення малочутливості замкненої САР (а не в сенсі повної відповідності моделі ОУ і реального ОУ) з ПІД-регулятором, розрахованим на основі апроксимованої моделі ОУ, до

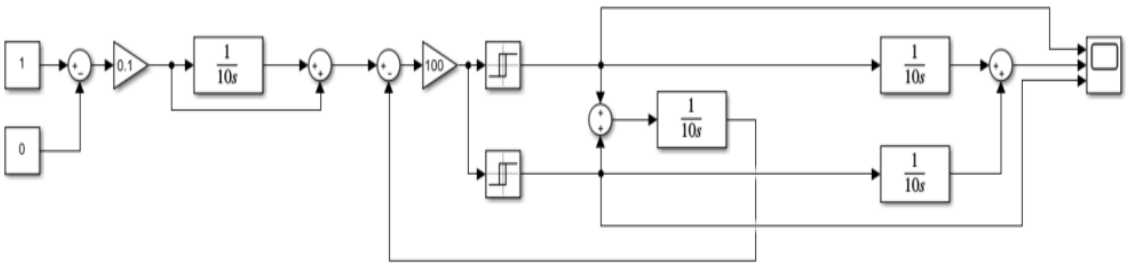


Рис. 14. Модель релейно-імпульсного регулятору з трипозиційним ВМ в СКМ Matlab Simulink

параметричних збурень ОУ. Коефіцієнт передачі ОУ вибирається одиничним (що відповідає представленню входу і виходу ОУ у нормованих відносних одиницях вимірювання, тобто фактично в одиницях сигналів вимірювання і одиницях регулюючої дії). Стала часу аперіодичної ланки 1-го порядку вибирається рівною сталій часу ланки транспортного запізнення (саме таке одиничне співвідношення забезпечує малочутливість САР до параметричних збурень). Відповідно розраховуються налагодження ПІД-регулятору Кр і Ті. Для формування аперіодичного перехідного процесу в замкненій САР (який забезпечує найбільший запас сталості замкненої САР) нормуючі коефіцієнти k_1 і k_2 вибираються одиничними.

Особливість реалізованого підходу до рохрахунку і моделювання САР полягає в тому, що апроксимована модель ОУ використовується виключно для розрахунку налагоджень ПІД-регулятору, а для моделювання перехідного процесу в замкненій САР використовується завжди «реальна» модель ОУ.

Апроксимована і параметризована запропонованим чином модель ОУ (послідовне з'єднання аперіодичної ланки першого порядку з одничним коефіцієнтом передачі і ланки транспортного запізнення, стала часу якої дорівнює сталій часу аперіодичної ланки) є інваріантною (з достатньою для практичних застосувань точністю) до параметрів ОУ, так як: 1) вхід і вихід ОУ представлений у нормованих відносних одиницях вимірювання, в результаті коефіцієнт передачі апроксимованої моделі ОУ завжди одиничний (незалежно від коефіцієнту передачі ОУ в абсолютних одиницях вимірювання); 2) одиничне співвідношення сталої часу аперіодичної ланки 1-го порядку до сталої часу ланки транспортного запізнення (незалежно від сталих часу ОУ) забезпечує малочутливість САР до параметричних збурень.

Сформульовані рекомендації з вибору моделі і параметрів теплоенергетичного ОУ і налагоджень ПІД-регулятору для одноконтурної і каскадної САР були перевірені і підтверджені шляхом аналізу перехідних процесів в замкнених САР, змодельованих в СКМ Matlab Simulink.

Висновки.

1. Реальна модель універсального теплоенергетичного ОУ в імітаційному моделюванні каскадної САР реалізована у вигляді послідовного з'єднання: для моделі ОУ в СКМ – 4-х аперіодичних ланок 1-го порядку (дві перші ланки – швидкісний ОУ; дві останні ланки – інерційний ОУ); для моделі ОУ в ПЛК – 2-х аперіодичних ланок 1-го порядку (перша ланка – швидкісний ОУ; друга ланка – інерційний ОУ).

2. Адекватність апроксимованої моделі теплоенергетичного ОУ не обов'яково має розумітись і реалізовуватись в сенсі повної відповідності моделі ОУ і реального ОУ.

3. Адекватність апроксимованої моделі теплоенергетичного ОУ має розумітись і реалізовуватись в сенсі забезпечення малочутливості замкненої САР з ПІД-регулятором, розрахованим на основі апроксимованої моделі ОУ, до параметричних збурень (добовий, сезонний і віковий дрейфи параметрів ОУ).

4. Апроксимована модель теплоенергетичного ОУ реалізується у вигляді послідовного з'єднання аперіодичної ланки 1-го порядку і ланки транспортного запізнення (достатньо одної аперіодичної ланки 1-го порядку, не потрібно використовувати дві аперіодичні ланки 1-го порядку). Коефіцієнт передачі ОУ вибирається одиничним (що відповідає представленню входу і виходу ОУ у нормованих відносних одиницях, тобто фактично в одиницях сигналів вимірювання і одиницях регулюючої дії). Стала часу ланки транспортного запізнення вибирається рівною сталій часу аперіодичної ланки 1-го порядку (саме таке одиничне співвідношення забезпечує малочутливість САР до параметричних збурень).

5. Налагодження ПІ-регулятору розраховуються за експрес-формулою. Коефіцієнт передачі ПІ-регулятору в одноконтурній САР і стабілізуючого ПІД-регулятору в каскадній САР вибираються одиничним. Коефіцієнт передачі коригуючого ПІД-регулятору в каскадній САР вибирається на порядок меншим за коефіцієнт передачі стабілізуючого ПІД-регулятору (тобто рівним 0.1). Сталі часу інтегрування ПІД-регулятору в одноконтурній САР і коригуючого і стабілізуючого ПІД-регуляторів вибираються рівними сталій часу аперіодичної ланки 1-го порядку в апроксимованій моделі ОУ (тобто рівними сталій часу ланки транспортного запізнення в апроксимованій моделі ОУ). Вказані налагодження ПІД-регуляторів забезпечують аперіодичний перехідний процес в замкненій САР (з найбільшим динамічним викидом, найменшим перерегулюванням і найменшим часом регулювання), що забезпечує практично максимально можливий запас сталості замкненої САР.

6. Апроксимована модель теплоенергетичного ОУ використовується виключно для розрахунку налагоджень ПІД-регулятору (для промислових застосувань практично достатньо використовувати експрес-формули). Перехілний процес в замкненій

САР має моделюватись для «реального» ОУ (який якраз і апроксимується моделлю ОУ). Малочутливість САР до параметричних збурень перевіряється також обов'язково моделюванням перехідного процесу в замкненій САР для «реальної» моделі ОУ.

7. Апроксимована і параметризована запропонованим чином модель ОУ (послідовне з'єднання аперіодичної ланки першого порядку з одиничним коефіцієнтом передачі і ланки транспортного запізнення, стала часу якої дорівнює сталій часу аперіодичної ланки) є інваріантною (з достатньою для практичних застосувань точністю) до параметрів ОУ, так як: 1) забезпечує відносну незалежність параметрів апроксимованої моделі ОУ від параметрів реального ОУ; 2) забезпечує малочутливість САР до параметричних збурень ОУ.

8. Розроблена структура аналогового ПІД-регулятору з незалежними П-, І- та Д-частинами (незалежними коефіцієнтами П-, І- та Д-частин) дає можливість, за необхідності, редукувати ПІ-регулятор до П-регулятору (який є оптимальним для астатичного ОУ) або до І-регулятору (який є оптимальним для статичного ОУ з великим перехідним запізненням), тому саме в цьому сенсі така структура ПІД-регулятору є універсальною. Розроблена структура ПІД-регулятору є роботоздатною і такою, що легко реалізується в ПЛК.

9. Розроблена структура релейно-імпульсного ПІД-регулятору (ДПД^2-закону регулювання), який в комплекті з трипозиційним ВМ (який апроксимується інтегратором) реалізує аналоговий ПІД-закон регулювання. ДПД^2-закон реалізується в ПЛК диференціюванням ПІД-закону; саме диференціювання реалізоване у вигляді ЧІМ (часо-імульсного модулятору, в якому тривалість імпульсу є постіна, а період імпульсу, тобто фактично тривалість між імпульсами, залежить від сталої часу інтегрування ПІД-закону). Сам ЧІМ реалізований у вигляді двох двопозиційних реле з гістерезисом відповідно для команд БІЛЬШЕ і МЕНШЕ, охоплених зворотними зв'язками через інтегратори, які імітують трипозиційний ВМ (стала часу інтегрування дорівнює сталій часу ВМ).). Використання ЧІМ в комплекті з універсальною структурою ПІД-регулятра дозволяє отримати універсальну структуру ДПД^2-регулятору. Розроблена структура ДПД^2-регулятору є роботоздатною і такою, що легко реалізується в ПЛК.

10. Запропоновані інваріантна модель ОУ і універсальні структури ПІД/ДПД^2-регуляторів можуть бути легко реалізовані відповідно в СКМ і в ПЛК в процесі імітаційного функціонального і структурного моделювання теплоенергетичних САР.

Список літератури:

1. Batiuk S.G. Simulation modeling and digital twinning of energy cyber-physical systems (cyber-energy systems). *Achievements of Ukraine and EU countries in technological innovations and invention* : collective monograph. Riga : Baltija Publishing, 2022. P. 44-109. DOI: https://doi.org/10.30525/978-9934-26-254-8. DOI: https://doi.org/10.30525/978-9934-26-254-8-2.

2. Vilanova, R., Alcántara, S., y Pedret, C. Sintonía de controladores PID: un enfoque analítico basado en el moldeo de la función de sensibilidad. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*. 2021. 18(4). P. 313–326. DOI: https://doi.org/10.4995/riai.2021.15422.

3. Novikov, P., Shtifzon, O., Bunke, O., & Batiuk, S. Selecting a method for the parametric adaptation of pi-controller in the control systems of boiler assemblies at thermal power stations with supercritical parameters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. 2, 2(116). P. 61-68. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254116.

Batiuk S.G., Vasianovych V.M., Voroniuk M.V., Voroshylov A.I. INVARIANT MODELS OF CONTROL OBJECTS AND UNIVERSAL STRUCTURES OF PID-CONTROLLERS IN THE IMITATION MODELING OF THERMAL ENERGY SYSTEMS OF AUTOMATIC REGULATION

The article is devoted to imitation modeling of modern thermal energy systems of automatic regulation. Modern thermal energy units and systems are complex technical objects that require a high level of automation to ensure stable and efficient operation. The operational efficiency of thermal energy systems of automatic regulation directly affects the economy, efficiency, productivity and reliability of thermal energy technological control objects. Imitation modeling is an important tool for analysis, design and optimization of the operational efficiency of thermal energy systems of automatic regulation.

The article states that two tasks of structural imitation modeling are important (even fundamental): 1) modeling control objects (or a technological control object as a set of control objects) in a computer mathematics system or in a PLC; 2) implementation of universal structures of PID-controllers in the PLC. The

article presents the results of research carried out at the Department of Automation of Energy Processes on these specified problems.

A model of an universal control object was developed and studied for simulating functional and structural modeling of a thermal energy technological control object. The purpose of the research is to develop a universal model of the control object, which is invariant (insensitive) to parametric disturbances of a system of automatic regulation, for modeling a thermal energy technological control object in a typical system of computer mathematics and in a typical PLC.

Universal structures of PID-controllers for simulated functional and structural modeling of thermal energy technological control object were developed and investigated. The purpose of the research: 1) the development of a universal structure of an analog PID-controller with independent P-, I-, and D-parts (PID-controller can be reduced to PD- and ID-controller), which, complete with an analog executive mechanism, implements the PID-regulation law; 2) development of an universal structure of a relay-pulse PID-controller (DPD^2 controller with time-pulse modulation), which, complete with a three-position executive mechanism, implements the PID-regulation law.

Key words: *thermal energy, technological control object, cyber-physical system, automated control system, system of automatic regulation, information-measuring system, system of program-logic control, automation of technological processes, software-technical means of automation, controller functionality, supervisory functionality, PID-controller, digital twin, edge device, Internet of things, imitation modeling, functional modeling, structural modeling.*

UDC 004.89
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/02

Berezhna O.B.
Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics

SYNERGY OF INFORMATION TECHNOLOGIES AND NEURAL NETWORKS FOR TEXT CONTENT GENERATION

The article discusses the potential of neural networks in creating textual content, highlighting their capabilities, limitations, and future directions of use. Neural networks are able to generate adaptive and personalized content that meets the specific requirements and preferences of users. However, the main challenges remain in ensuring the quality, relevance, and originality of automatically generated texts, which is critical for their practical application. Combining information technology with the capabilities of neural networks opens up prospects for improving these processes, but there is still a need for a deeper study of the optimization of such systems. The relevance of the study is due to the possible impact of these solutions on various aspects of public life and the cultural environment.

The paper provides a comparative analysis of the features of using recurrent neural networks, variational autoencoders, generative adversarial networks, and transformers in the creation of textual content, and explores their advantages and limitations in application. Possible difficulties in using generative adversarial networks to create textual and media content (photos, drawings, animations) and the reasons for generating content with unrealistic content are discussed in more detail.

The author proposes criteria for creating a comprehensive assessment of the quality of generated content that can be adapted to specific tasks or requirements. The results of the study include a comprehensive review of the capabilities and limitations of different types of neural networks in creating textual content; examples of their application in various fields such as writing, marketing and business; limitations of using neural networks to create textual content in creative writing. The author emphasizes the need for careful consideration of ethical aspects and the development of recommendations and standards for the use of neural networks to generate a variety of content.

Key words: *neural network, text, generation, artificial intelligence, creativity, generative model, content.*

Formulation of the problem. The increasing power of computing systems and the development of deep learning algorithms make it possible to use neural networks to create text content, which opens up new opportunities for automating and improving the creative process. Modern technologies for generating text content play an important role in many areas such as journalism, education, e-commerce, and digital marketing. Neural networks can help create personalized and adaptive content that meets the individual needs and preferences of the audience. However, there is a problem of ensuring the high quality, relevance, and uniqueness of automatically generated texts, which is critical for their practical use. The synergy of information technologies and neural networks opens up new opportunities for solving these problems, but the aspects of optimizing such systems to achieve a balance between process automation and quality control of text content are not sufficiently studied. All this determines the relevance of this study, which is determined not only by technical capabilities but also by the potential impact of neural networks on various aspects of modern society and culture.

Researching this issue will help improve automatic text generation technologies, which can have a significant impact on the automation of routine processes in media, education, and business.Solving this problem can also ensure the integration of such solutions into broader technological ecosystems.

Analysis of recent research and publications. Works [2, 10] analyze the results of integrating neural networks with information systems that allow scaling the process of generating textual content in real time. The authors offer a systematic critical review of the general tasks, main approaches and evaluation methods in the field of transformer-based text generation, and provide their criteria for assessing the quality of the generated test, which need to be improved and expanded.

Karthik T. S. notes that text synthesis using neural networks is used in various business areas, in particular to create personalized recommendations, and in the healthcare industry to analyze medical images that help predict the future development of diseases.

As a result, doctors can better detect abnormalities during computed tomography, which improves

patient outcomes [4]. AI helps to generate synthetic data that effectively supports model training data and algorithm development without posing a risk to confidential information.

The author Kundu R. began to consider the various risks of using neural networks for text generation, including the problem of bias in the data used to train models, as well as the risks of losing the uniqueness of author's content [5].The issue of transparency of algorithms and control over generation results remains important.

Task statement. The main purpose of the article is to investigate the effectiveness of the interaction between information technologies and neural networks for automated text content generation and to determine the optimal approaches to the use of these technologies in real industries such as writing, marketing, and business.

In addition, the paper examines the impact of modern neural network architectures on the quality of text generation, and explores the features of using basic neural network models for text generation. Criteria for a comprehensive assessment of the quality of the generated content are proposed, and prospects for the development of synergy between information technology and neural networks are identified.

Forecasts are given on the trends of the industry development, including increasing the adaptability of texts to the cultural or linguistic context.

Outline of the main material of the study. The use of neural networks in creative industries (scriptwriting, creation of advertising texts) is a promising area that opens up new horizons for authors and literary creators. Neural networks, in particular generative models, have a powerful potential in generating texts that adapt to the styles and genres of different writers and are capable of reproducing unique elements of the style of different authors.

In contemporary creative writing, various types of neural networks are used that are specially adapted for text generation.

One of the most common types is recurrent neural networks or recurrent neural network (RNN). These networks are capable of storing previous information states, which allows them to analyze and generate text sequences taking into account the context [3]. An important area for creating textual content is the use of generative models, such as variational autoencoders (VAEs) and generative adversarial networks (GANs). VAEs allow creating new textual variants while maintaining the ability to latent space, which contributes to the creation of unique and variable texts [7, 8].

Generative adversarial networks, in turn, are capable of adapting to various text generation tasks, including the creation of fiction, short stories, and even technical materials. Their high levels of abstraction and ability to understand the semantics of text make them a powerful tool for creative work, and they are capable of imitating individual styles and expressing authors' emotions.

In recent years, deep neural networks, in particular deep autoencoders and transformers, have been gaining popularity. Transformers have the ability to process sequences in parallel and use attention mechanisms to interact with different parts of the text, which contributes to high-quality generation [1]. Recurrent networks, due to their ability to recurrently use information, can generate sentence sequences taking into account the previous context. An important aspect of neural network architectures in text generation is their ability to learn at different levels of abstraction, which makes their text generation potential very flexible and high quality.

Table 1 provides a comparative analysis of neural networks for creating unique and variable texts.

Table 2 provides an overview of the advantages and limitations of different types of neural networks in the context of their use for text content creation.

“Gradient fading” for recurrent neural networks can affect text generation in the sense that the model may have difficulty learning and reproducing long and complex dependencies in the text. The loss of long-term dependencies between distant parts of the text can lead to a loss of detail and accuracy in text generation [3]. As a result, less comprehensible texts can be created.

To overcome these problems, modifications of recurrent networks such as Long Short-Term Memory (LSTM) and Gated Recurrent Unit (GRU) are often used to manage gradients and retain long-term dependencies more efficiently. Alternative architectures such as transformers can also be used, which have their own mechanisms for processing long text sequences.

The limitations of variational autoencoders are the difficulty of interpreting the latent space, i.e., the abstract space in which important characteristics or features of the data can be represented [9]. The difficulty of interpreting the latent space may arise for the following reasons:

1. One coordinate in latent space can correspond to several independent factors in the original data. Thus, changes in one coordinate can reflect not one, but several different characteristics.

2. The values at each coordinate in the latent space represent probabilities that do not always have a single meaning or interpretation.

Table 1

Features of neural networks for text creation

Features i	Recurrent neural networks (RNN)	Variational autoencoders (VAE)	Generative adversarial networks (GAN)	Transformers
Structure	Ability to "remember" the context	Latent space	Generator and discriminator	Attention mechanism
Participation in the process	Iterative text generation	Ability to vary	Competition between generator and discriminator	Parallel processing of sequences
Context generation	Dependence on previous context	Ability to preserve latent space	Ability to create realistic context	Efficient processing of long texts
Applications	Sequence and text generation	Reconstruction and text generation	Image and text generation, personalization	Text generation, translation, context modeling
Limitations	Computational cost for long sequences	Latent space interpretation	Robustness and learning issues	Computational cost for large text volumes

Table 2

Features of using neural networks to create texts

Neural networks	Advantages	Limitations
Recurrent neural networks	Ability to model sequences; high efficiency in working with texts; use of context to structure the text	Problems with the cost of computing with long sequences; occurrence of "gradient fading" in long sequences
Variational autoencoders	The ability to generate variations; experiments with content diversity; ability to create unique content	Difficulty in interpreting latent space; cost of computing with large amounts of text
Generative adversarial networks	Realistic text appearance due to the competition between the generator and the discriminator; high ability to generate authentic content; variability in image and text generation	Problems with stability and learning; the possibility of creating "surreal" content
Transformers	High efficiency of processing long texts; parallel processing of sequences; efficiency of attention mechanisms for creating context; ability to high-level abstraction and semantics understanding	Cost of computing with large amounts of text

3. Different points in the latent space may correspond to the same representation of the original data, making interpretation difficult. To solve these problems, additional techniques can be used, such as the introduction of latent variables or the use of more complex VAE architectures. GANs can be used to generate both text and other types of content, including media content such as photos, drawings, and animations. Let us consider the difficulties in using generative adversarial networks for content creation.

4. GANs may face the problem of the generator generating different modes during training, which can lead to unstable generation where the network tries to switch between different types of content.

5. The results may be affected by difficulties in achieving a balance between the generator and discriminator models.

6. Similarly to recurrent neural networks, GANs can also face the problem of gradient fading, where gradients become very small or disappear as the error propagates backwards.

The ability to create "surreal" content indicates that GANs can generate images or content that may be fantastic or unrealistic [8]. This can occur for several reasons:

1. If a GAN does not have enough and varied input data, it can generate texts or images that have no analogues in real data, thus creating surreal content.

2. GANs may be able to explore different regions of latent space, which leads to the creation of unpredictable and fantastic content variations.

3. The generator can create content that combines different elements or contexts, which can lead to unexpected and creative results.

The use of transformer neural networks for text generation is complicated by the large number of parameters, which can require significant computing resources, especially when processing large amounts of data. In addition, the process of training such models can take a long time and require optimization of hyperparameters to achieve high quality text generation. An example of a successful use of the transformer architecture is the GPT-4 language

predictive model developed by OpenAI in 2023. The developers claim that the new generation of the neural network is significantly more powerful than GPT 3.5, and the developed multimodal model can work not only with text but also with images [9].

To summarize, neural network architectures not only have powerful text analysis and generation capabilities, but are also constantly evolving. Innovative approaches and combinations of different types of neural networks expand their potential in creating diverse, expressive, and intellectually rich literary works. Neural networks are able to generate texts, adapting them to the context, genre, or style, allowing authors to experiment with new forms of creativity [1]. They not only reproduce syntax, but also convey emotional backgrounds, contributing to the creation of expressive works. Such models act as personalization tools, adapting content to readers' tastes, and as partners in the creative process, offering ideas and new perspectives. However, there are challenges related to the author's identity and originality of texts.

There is an urgent need to develop a methodology for assessing the quality of generated content. Paper [10], for example, proposes to evaluate the quality of the generated text according to such general criteria as: 1) assessment of how fluent the language of the source text is; 2) assessment of how well the generated text reflects the facts described in the context; 3) assessment of how grammatically correct the generated text is; 4) assessment of the variety of types and styles.

The quality criteria for the produced texts can be based on the following components, shown in Fig. 1.

These criteria can be adapted to meet specific tasks or requirements. Evaluation of automatically generated texts can be done with the help of experts or automated methods.

Let us consider the main difficulties of using neural networks in the creative process:

1. Neural networks can generate ambiguous or unpredictable results, which can complicate the creative process, especially when interpretation or a specific tone is important.

2. The content created may be trivial, devoid of emotion, or not meet the standards of creativity

3. Neural networks can learn and reproduce existing biases or stereotypes, which can lead to the creation of content with an incorrect reflection of reality.

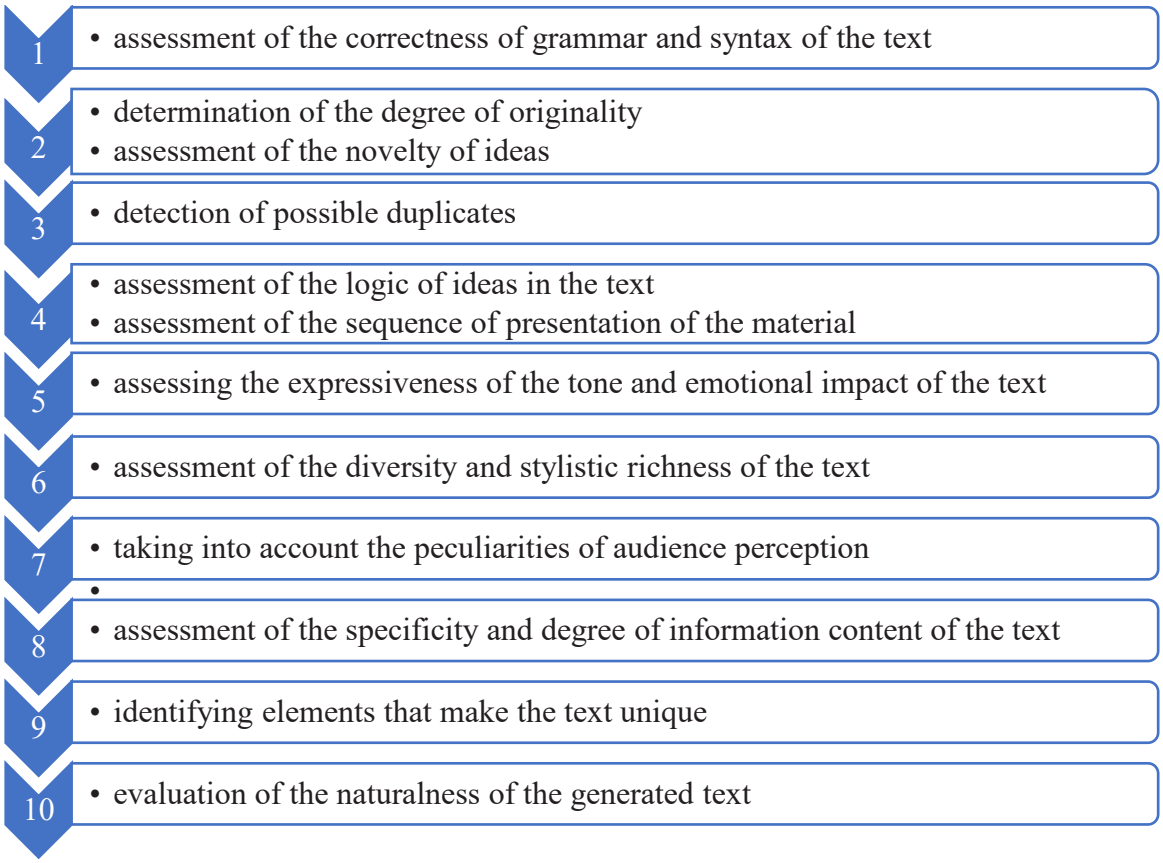


Fig. 1. Structure of a comprehensive assessment of the quality of generated text

4. Language models may have difficulty understanding the broader context, which can affect the quality and understanding of a creative task.

5. The use of powerful neural networks may require significant computational resources and large training data, which may be a limitation for some creative projects.

Conclusions. The use of neural networks in creative writing opens up wide opportunities for experimentation, personalization of texts, and adaptation to different genres and styles. At the same time, this approach requires attention to ethical issues, preservation of the author's individuality, and consideration of the risks of unpredictable results that may arise during the automated creation of literary works.

A promising area is the development of methods that allow creators to have more control over generation, including the parameters of style, emotion, and other characteristics, with limited training data. Considerable focus should be given to the development of safety standards and ethical guidelines for the use of neural networks in creative fields, in particular to avoid negative consequences or abuse.

Despite the difficulties, the use of neural networks in creative writing is a promising area that could change the paradigm of text creation in the future.

Bibliography:

1. Best Free AI Art Generators to Create Image From Text [Free & Paid] URL: https://www.geeksforgeeks.org/best-free-ai-art-generators-to-create-image-from-text/ (дата звернення 10.11.2024).

2. Folk H. 13 Free AI Text Generator Tools To Use At Work In 2024 URL:https://hive.com/blog/free-ai-text-generator-tools/ (дата звернення 10.11.2024).

3. Introduction to Recurrent Neural Network URL:https://www.geeksforgeeks.org/introduction-to-recurrent-neural-network/ (дата звернення 18.11.2024).

4. Karthik T. S. Beyond ChatGPT: How Generative AI Is Shaping The Future Of Businesses. URL: https://www.forbes.com/councils /forbestechcouncil/2024/08/22/beyond-chatgpt-how-generative-ai-is-shaping-the-future-of-businesses/ (дата звернення 25.11.2024).

5. Kundu R. AI Risks: Exploring the Critical Challenges of Artificial Intelligence. URL: https://www.lakera.ai/blog/risks-of-ai (дата звернення 25.11.2024).

6. Nath S. Generative Models: Unraveling the Magic of GANs and VAEs /*Medium.* URL: https://medium.com/@sruthy.sn91/generative-models-unraveling-the-magic-of-gans-and-vaes-66a5858d4596 (дата звернення 18.11.2024).

7. Nicola G. Text generation with a Variational Autoencoder URL: https://nicgian.github.io/text-generation-vae/ (дата звернення 18.11.2024).

8. Rosa G. A. Survey on Text Generation using Generative Adversarial Networks / Gustavo H. de Rosa , Jo˜ao P. Papa URL: https://arxiv.org/pdf/2212.11119.pdf (дата звернення 18.11.2024).

9. Santhosh S. Variational autoencoder(VAE) for data generation / *Medium* URL:https://medium.com/@sthanikamsanthosh1994/variational-autoencoder-vae-for-data-generation-956b89aeaa78 (дата звернення 10.11.2024).

10. Zhang H, Song H., Li S. A Survey of Controllable Text Generation using Transformer-based Pre-trained Language Models URL:https://ar5iv.labs.arxiv.org/html/2201.05337 (дата звернення 25.11.2024).

Бережна О.Б. СИНЕРГІЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ І НЕЙРОМЕРЕЖ ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ ТЕКСТОВОГО КОНТЕНТУ

У статті обговорюється потенціал нейронних мереж у створенні текстового контенту, висвітлюються їхні можливості, обмеження та майбутні напрямки використання. Нейромережі здатні генерувати адаптивний та персоналізований контент, який відповідає специфічним вимогам і перевагам користувачів. Проте основними викликами залишаються забезпечення якості, релевантності й оригінальності автоматично створених текстів, що критично важливо для їх практичного застосування. Поєднання інформаційних технологій із можливостями нейромереж відкриває перспективи для покращення цих процесів, однак залишається необхідність глибшого вивчення питань оптимізації таких систем. Актуальність дослідження обумовлена можливим впливом цих рішень на різні аспекти суспільного життя та культурного середовища.

У роботі надано порівняльний аналіз особливостей використання рекурентних нейромереж, варіаційних автокодерів, генеративних змагальних мереж та трансформерів при створенні текстового контенту, досліджено їх переваги та обмеження у застосуванні. Більш детально розглянуто можливі складнощі у використанні генеративних змагальних мереж для створення текстового та медійного контенту (фотографії, малюнки, анімації) та причини генерації контенту з нереалістичним змістом.

Автор пропонує критерії для створення комплексної оцінки якості згенерованого контенту, які можуть бути адаптовані відповідно до конкретних завдань чи вимог. Результати дослідження включають комплексний огляд можливостей і обмежень нейронних мереж різного типу у створенні текстового контенту; приклади їх застосування в різних сферах, таких як письменництво, маркетинг і бізнес; обмеження використання нейронних мереж для створення текстового контенту у творчому письменництві. Наголошено на необхідності ретельного розгляду етичних аспектів і розробки рекомендацій і стандартів для використання нейромереж для генерації різноманітного контенту.

Ключові слова: *нейромережа, текст, генерація, штучний інтелект, творчість, генеративна модель, контент.*

УДК 004.738.5:004.056.53
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/03

Боровскова Є.А.
AppsFlyer Ltd

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ СТРАТЕГІЙ КЕШУВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ СЕРВЕРНИХ ДОДАТКІВ НА NESTJS

Стаття присвячена дослідженню продуктивності серверних додатків у сучасних інформаційних системах, що працюють із великими обсягами даних у режимі реального часу. Розкрито необхідність підвищення продуктивності для забезпечення стабільної роботи таких додатків за умов підвищеного навантаження, що є критично важливим для оптимізації використання ресурсів та скорочення часу обробки запитів. Встановлено, що є управління кешем є однією з ефективних стратегій, яка зменшує кількість звернень до бази даних, знижує навантаження на процесор і скорочує час обробки запитів.

У статті також висвітлено сучасні підходи до кешування та визначено їхній вплив на продуктивність серверних систем, що базуються на фреймворку NestJS. У процесі дослідження використано методи тестування навантаження, зокрема Apache JMeter, для моделювання високонавантажених середовищ, а також інструменти моніторингу, такі як Datadog, для контролю ефективності кешування в реальному часі. З'ясовано, що впровадження кешування зменшує середній час обробки запитів на 90%, знижує навантаження на процесор наполовину та скорочує кількість звернень до бази даних на 95%. Це дозволяє підвищити ефективність роботи додатків і знизити витрати на інфраструктуру, зокрема завдяки зменшенню споживання оперативної пам'яті та процесорних ресурсів.

Визначено важливість правильного вибору стратегій кешування, які враховують специфіку запитів і доступні ресурси системи. Розкрито ефективність адаптивного кешування на основі аналітики реального часу та TTL-кешування, що дозволяє динамічно адаптувати систему для забезпечення максимальної ефективності. Наголошено на потребі ретельного аналізу й налаштування, щоб уникнути проблем із застарілими даними та забезпечити коректну консистентність інформації.

Стаття також містить аналіз впливу обраних стратегій кешування на оптимізацію витрат на підтримку інфраструктури. Результати підтверджують, що застосування сучасних підходів до управління кешем дозволяє досягти значного підвищення продуктивності та стабільності серверних додатків у високонавантажених умовах. Перспективи подальших досліджень полягають у вивченні інтеграції машинного навчання для автоматизації управління кешем, що сприятиме оптимізації ресурсів на основі аналізу історичних даних і передбачення навантаження на систему.

Ключові слова: *оптимізація продуктивності, серверні додатки, управління кешем, ефективність оброблення даних, стратегії збереження.*

Постановка проблеми. Проблема оптимізації продуктивності серверних додатків набуває особливого значення в умовах стрімкого зростання обсягів даних і підвищених вимог до ефективності їх оброблення. У сучасному інформаційному середовищі серверні додатки є ключовими компонентами інфраструктури, що забезпечують доступ до різноманітних сервісів і функціональних можливостей. З огляду на це оптимізація їх продуктивності є важливою задачею як з наукової, так і з практичної точки зору. Одним із важливих аспектів такої оптимізації є ефективне управління кешем, оскільки правильний підхід до кешування дозволяє значно знизити навантаження на сервери, скоротити час оброблення запитів та зменшити витрати на обчислювальні ресурси. Використання фреймворку NestJS, який є популярним для створення високопродуктивних серверних додатків, потребує визначення оптимальних стратегій кешування для підвищення його ефективності в різних умовах.

Розв'язання цієї проблеми є актуальним не лише для підвищення продуктивності окремих додатків, але й для забезпечення стабільної та ефективної роботи комплексних систем, які обслуговують великий обсяг користувачів. Це завдання має тісний зв'язок з питаннями масштабованості та надійності додатків, а також з актуальними науковими дослідженнями в галузі розподілених обчислень і управління даними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз сучасних досліджень, присвячених опти-

мальним стратегіям кешування для підвищення продуктивності серверних додатків, охоплює різноманітні підходи, зокрема порівняння фреймворків, вибір стратегій кешування та автоматизацію процесів.

Дослідження М. Прасад і У. Падма (M. Prasad, U. Padma) порівнює продуктивність ExpressJS і Fastify в контексті фреймворку NestJS, підкреслюючи важливість вибору фреймворку для досягнення високої продуктивності серверних додатків [1]. Це дослідження доповнюється роботою Б. Зіма і М. Барщ (B. Zima, M. Barszcz), які порівнюють різні Node.js фреймворки, що дозволяє вибрати найоптимальніший варіант залежно від умов використання [2]. Аналогічно дослідження М. Голець і М. Плехавської-Войчик (M. Golec, M. Plechawska-Wójcik) підкреслює значення використання TypeScript фреймворків для побудови серверних додатків і підвищення їх продуктивності через оптимізацію кешування [3].

Також предметом сучасних досліджень є стратегії кешування. М. Зульфа, Р. Хартанто і А. Перманасарі (M. Zulfa, R. Hartanto, A. Permanasari) у своєму систематичному огляді аналізують різні стратегії кешування для вебдодатків, наголошуючи на важливості оптимального управління кешем для зменшення навантаження на сервери та покращення продуктивності [4]. Це узгоджується з дослідженням М. Заеда (M. Zahed) та співавторів, де розглянуто «зелені» стратегії кешування для комунікаційних мереж нового покоління з акцентуванням на зменшенні енергоспоживання без втрати продуктивності [5].

М. Наїм (M. Naeem) з колегами вивчає різні стратегії кешування популярного контенту в мережах Named Data Networking (NDN), аналізуючи порівняльну ефективність стратегій кешування, а також пропонує складні стратегії для оптимізації кешування контенту, що дозволяє суттєво підвищити продуктивність систем у реальних умовах [6; 7]. Це підкреслює важливість вибору стратегії кешування для забезпечення ефективного використання ресурсів.

Л. Чжао (L. Zhao) та інші досліджують інтелектуальні стратегії кешування для автономного транспорту, зокрема в системах 6G, де використання таких підходів дозволяє суттєво підвищити ефективність оброблення даних [8]. Дж. Шуджа (J. Shuja) та інші акцентують увагу на автоматизації процесів кешування через машинне навчання, що дозволяє системам динамічно адаптуватися до умов використання, підвищуючи продуктивність і гнучкість серверних додатків [9].

С. Чен (C. Chen et al.) та інші у своєму дослідженні акцентують увагу на інтелектуальних стратегіях кешування, що враховують часово-просторові характеристики для покращення продуктивності в транспортних мережах [10]. А. Бекман (A. Beckmann et al.) та співавтори підкреслюють важливість використання цифрових систем для підвищення продуктивності через інтеграцію кешування в середовищі спільної роботи [11]. Т. Кушевич і Д. Блажевич (T. Kušević, D. Blažević) порівнюють функціональні можливості протоколів HTTP і MQTT, що також впливає на вибір стратегії кешування та оптимізацію використання серверних ресурсів [12]. Нарешті, дослідження Ч. Лі (C. Li) та співавторів присвячено стратегіям кешування в мобільних обчислювальних системах, підкреслено важливість оптимізації затримок та енергоспоживання [13].

Ці дослідження підкреслюють важливість правильного вибору фреймворків та стратегій кешування для досягнення максимальної ефективності серверних додатків, зокрема через автоматизацію процесів і застосування інтелектуальних рішень.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри велику кількість досліджень у сфері кешування серверних додатків, залишаються не розв'язаними питання щодо детального аналізу сучасних підходів та їх реального впливу на продуктивність. Окрім загальних принципів кешування, необхідно глибше дослідити ключові фактори, що впливають на швидкість виконання HTTP-запитів у таких фреймворках, як NestJS, зокрема в умовах навантаженого середовища. Вивчення цього аспекту може бути підкріплено емпіричними дослідженнями із застосуванням інструментів для тестування навантаження, що дозволить оцінити ефективність різних стратегій кешування в реальних умовах. На основі отриманих даних доцільно розробити оптимальні стратегії, орієнтовані на підвищення продуктивності додатків та ефективного моніторингу їх роботи, що стане вагомим внеском у практику адміністрування та підтримки серверних систем.

Постановка завдання. Мета статті полягає в дослідженні та обґрунтуванні оптимальних стратегій кешування для підвищення продуктивності серверних додатків на основі фреймворку NestJS з акцентом на покращення швидкості оброблення запитів і ефективності використання ресурсів.

Завдання статті:

1. Проаналізувати сучасні підходи до кешування в серверних додатках та їх вплив на продуктивність;

2. Визначити ключові фактори, що впливають на швидкість виконання HTTP-запитів у середовищі NestJS з використанням кешування;

3. Провести емпіричне дослідження з використанням інструментів тестування навантаження для оцінювання ефективності вибраних стратегій;

4. Надати рекомендації щодо впровадження оптимальних стратегій кешування для підвищення продуктивності та ефективного моніторингу серверних додатків.

Виклад основного матеріалу. Оптимізація продуктивності серверних додатків є важливим завданням у сучасних інформаційних системах, оскільки вона безпосередньо впливає на швидкість оброблення запитів і ефективність використання ресурсів. Одним із найпоширеніших способів підвищення продуктивності є кешування, яке дозволяє зберігати результати виконаних запитів для їх повторного використання.

Оцінювання потенційних економічних вигод від застосування кешування в серверних додатках є важливим аспектом аналізу його ефективності. Зниження навантаження на інфраструктуру та оптимізація використання серверних ресурсів можуть призвести до значного скорочення витрат, що особливо актуально в умовах великих навантажень на систему. Використання кешування дозволяє значно зменшити кількість звернень до бази даних, що у свою чергу знижує необхідність у дорогих обчислювальних потужностях для підтримки високої швидкості оброблення запитів. Менша кількість операцій введення – виведення та зниження завантаженості бази даних можуть скоротити витрати на масштабування серверів або додаткові ресурси для підтримки стабільної роботи під час пікових навантажень [1].

Економічні вигоди також проявляються через підвищення масштабованості системи. Завдяки зниженню споживання процесорних ресурсів та оперативної пам'яті під час кешування серверні додатки можуть обробляти більшу кількість запитів без необхідності збільшення кількості фізичних або віртуальних серверів. Це дозволяє знизити витрати на хостинг, оренду або підтримку додаткових серверних потужностей, що є значною статтею витрат у середовищі, де продуктивність та швидкість відповіді мають вирішальне значення для користувачів.

Крім того, скорочення часу оброблення запитів дозволяє забезпечити кращий користувацький досвід, що є важливим економічним чинником для компаній, які надають онлайн-послуги або працюють у сфері електронної комерції. Швидше оброблення запитів та зменшення затримок можуть збільшити лояльність користувачів і покращити конверсію, що безпосередньо впливає на дохід [2; 3]. Таким чином, економічний ефект від впровадження кешування не обмежується лише оптимізацією витрат на інфраструктуру, але й сприяє підвищенню рентабельності бізнесу загалом через покращення показників продуктивності.

Крім того, зниження енергоспоживання серверів унаслідок зменшення навантаження на процесорні ресурси також може стати важливим економічним фактором. Сервери, що працюють з меншими навантаженнями, відповідно, споживають менше енергії, що знижує витрати на підтримку роботи дата-центрів і одночасно сприяє екологічній стійкості компаній, які впроваджують такі технології. У довгостроковій перспективі це може стати важливим чинником зменшення операційних витрат, особливо для великих організацій з великим обсягом оброблення даних.

Таким чином, кешування не лише оптимізує технічні параметри серверної інфраструктури, але й надає реальні економічні вигоди завдяки скороченню витрат на інфраструктуру, підвищенню масштабованості системи та покращенню користувацького досвіду.

Сучасні підходи до кешування поділяються на кілька рівнів, включаючи клієнтське кешування, серверне кешування, а також проксі-кешування. Важливою частиною ефективного кешування є вибір правильної стратегії зберігання та оновлення даних. Це включає такі підходи, як: кешування на основі часу життя даних (TTL); адаптивне кешування, де час життя даних залежить від частоти їх запитів; стратегія кешування «лінивого завантаження» (lazy loading), де дані кешуються тільки після першого запиту.

У таблиці 1 продемонстровано ключові характеристики різних підходів до кешування, їх переваги та недоліки в контексті використання серверних додатків, що базуються на фреймворці NestJS.

Використання відповідної стратегії в серверних додатках, що базуються на фреймворці NestJS, дозволяє значно підвищити продуктивність системи. Наприклад, серверне кешування знижує кількість звернень до бази даних, що є критично важливим для високонавантажених додатків, де кожен запит до бази може займати значний час. На практиці це дозволяє зменшити час відповіді на запити з кількох секунд до мілісекунд, що робить систему більш чутливою та ефективною. Інструменти тестування, як-от Apache JMeter, можуть бути використані для вимірювання цих

Таблиця 1

Ключові характеристики різних підходів до кешування, що базуються на фреймворці NestJS

Підхід до кешування	Переваги	Недоліки	Застосування на практиці
Клієнтське кешування	Зменшує кількість звернень до сервера; швидкий доступ до даних	Дані можуть бути застарілими	Часто використовується для зберігання статичних ресурсів, як-от зображення та стилі
Серверне кешування	Зменшує навантаження на сервер і базу даних, прискорює оброблення запитів	Вимагає додаткових ресурсів для керування кешем	Використовується для збереження результатів складних запитів до бази даних
Проксі-кешування	Дозволяє зберігати дані на проміжних серверах, що знижує навантаження на основний сервер	Може призводити до зберігання застарілих даних	Ефективно для масштабованих систем з великим обсягом запитів
Кешування на основі TTL	Встановлює конкретний час життя даних у кеші, що забезпечує їх актуальність	Може спричиняти видалення даних до повторного запиту	Використовується для даних, які потребують регулярного оновлення
Адаптивне кешування	Оптимізує використання кешу на основі частоти доступу до даних	Складна реалізація, потребує аналізу частоти запитів	Корисно для зменшення обчислювальних витрат для рідко використовуваних даних
Lazy loading (ліниве завантаження)	Дані кешуються тільки після першого запиту, що зменшує початкове навантаження на сервер	Перший запит може бути повільним, оскільки відсутнє попереднє кешування	Використовується для систем, де початкове навантаження на сервер має бути мінімальним

Джерело: сформовано автором на підставі [5; 6; 7; 8]

показників продуктивності в реальних умовах, тоді як системи моніторингу, зокрема Datadog, забезпечують постійний аналіз стану системи та дозволяють вчасно виявляти можливі проблеми або «вузькі місця» в роботі серверних додатків.

Кешування на основі TTL надає можливість налаштувати автоматичне видалення даних з кешу через певний проміжок часу, що дозволяє підтримувати баланс між актуальністю даних і ефективністю системи. Практично це особливо важливо для додатків, які працюють з динамічними даними, що часто оновлюються.

Швидкість виконання HTTP-запитів у серверних додатках на базі NestJS значною мірою залежить від низки факторів, які впливають на ефективність використання кешу. Основними аспектами, що визначають продуктивність системи, є конфігурація кешування, розмір і складність запитів, а також апаратні ресурси, доступні для виконання операцій. NestJS дозволяє впроваджувати різні стратегії кешування, включаючи глобальне кешування для всього додатку або вибіркове кешування на рівні окремих маршрутів чи запитів, що безпосередньо впливає на швидкість оброблення запитів.

Ефективність кешування також залежить від характеру запитів, які можуть бути ідентичними або подібними. У разі часто повторюваних запитів кешування дозволяє уникнути повторного оброблення тих самих даних, що значно прискорює відповіді на запити. Однак за складних запитів або запитів до великих обсягів даних кешування може бути менш ефективним, якщо обсяги даних, що зберігаються в кеші, перевищують доступні ресурси. Інший важливий аспект – це вибір стратегії кешування. Наприклад, використання кешування на основі часу життя даних (TTL) дозволяє контролювати актуальність збереженої інформації, проте це може призводити до того, що в разі повторних запитів застарілі дані будуть видалені з кешу, і запит доведеться обробляти заново. З іншого боку, надмірно тривале зберігання даних у кеші може перевантажувати сервер обмеженими ресурсами пам'яті.

У таблиці 2 проілюстровано основні фактори, що впливають на швидкість виконання HTTP-запитів із використанням кешування в середовищі NestJS.

Вплив кешування на продуктивність серверних додатків можна більш точно оцінити через детальне дослідження ключових факторів, що визначають швидкість виконання HTTP-запитів [10]. З огляду на специфіку фреймворку NestJS кожен із зазначених у таблиці факторів по-різному

Таблиця 2

Ключові фактори, що впливають на швидкість виконання HTTP-запитів із використанням кешування в середовищі NestJS

Фактор	Вплив на продуктивність	Опис
Конфігурація кешування	Високий	Вибір глобального чи вибіркового кешування впливає на обсяг даних, які можна зберігати в кеші, що безпосередньо впливає на швидкість оброблення запитів
Характер запитів	Середній	Частота та ідентичність запитів визначають, наскільки ефективно система може використовувати дані, що зберігаються в кеші для повторного оброблення
Складність запитів	Високий	Більш складні запити, що вимагають доступу до великих обсягів даних, можуть уповільнювати продуктивність системи через обмеження кешу
Стратегія збереження в кеші	Середній	Використання TTL або адаптивного кешування може вплинути на ефективність системи залежно від частоти звернень та актуальності даних
Апаратні ресурси	Високий	Кількість доступної пам'яті та потужність процесора визначають, скільки даних можна зберігати в кеші та наскільки швидко обробляються запити

Джерело: сформовано автором

впливає на загальну продуктивність. Конфігурація кешування, наприклад, визначає, як дані будуть зберігатися і використовуватися: глобальна стратегія кешування охоплює всі маршрути, тоді як вибіркове кешування дозволяє зберігати дані лише для певних маршрутів, що дає змогу краще оптимізувати ресурси для часто використовуваних даних.

Аналіз характеру запитів також розкриває важливий аспект продуктивності. Частота звернень до одних і тих самих ресурсів напряму впливає на доцільність кешування: для часто повторюваних запитів виграш у продуктивності буде значним, тоді як для унікальних або складних запитів кешування може бути менш ефективним або навіть зайвим.

Особлива увага приділяється стратегіям збереження в кеші, адже використання таких механізмів, як TTL (час життя кешованих даних), дозволяє підтримувати актуальність інформації, але вимагає ретельного налаштування. Недостатньо гнучка стратегія може призводити до затримок або до видалення необхідних даних з кешу передчасно, що вплине на час оброблення нових запитів.

У реальних умовах вплив цих факторів на продуктивність залежить також від апаратних ресурсів. Кількість доступної пам'яті та процесорної потужності безпосередньо визначає ефективність роботи кешу. Недостатня кількість оперативної пам'яті може призвести до ситуації, коли кешування не забезпечить очікуваного підвищення продуктивності або навіть погіршить ситуацію через часте очищення кешу [12; 13].

Сучасні дослідження в галузі кешування підкреслюють важливість ефективної інтеграції цієї технології для підвищення продуктивності серверних додатків. Наприклад, у фреймворці NestJS реалізація кешування дозволяє значно зменшити навантаження на базу даних та прискорити оброблення запитів [14]. Використання кешування у Node.js, зокрема через такі технології, як Redis, демонструє значні переваги в зниженні навантаження на систему [15, 16]. Одним із важливих інструментів, який дозволяє легко інтегрувати кешування в серверні додатки, є npm-пакет cache-manager, що забезпечує високу гнучкість у виборі стратегії кешування [17]. Крім того, для моніторингу та аналізу продуктивності систем у реальному часі використовуються такі платформи, як Datadog, які дозволяють контролювати стан серверів і виявляти потенційні вузькі місця [18]. API, розроблені на базі NestJS, також можуть бути оптимізовані завдяки використанню адаптивних підходів до кешування, що значно покращує швидкість виконання HTTP-запитів [19].

Інструменти для тестування навантаження, як-от Apache JMeter, забезпечують моделювання умов високого навантаження, дозволяючи в реальних умовах оцінювати ефективність упровадженого кешування [20; 21]. Як демонструють дослідження, використання Redis для кешування запитів допомагає оптимізувати не лише продук-

тивність серверних додатків, а й знижує витрати на підтримку інфраструктури [22]. Такі підходи підкреслюють важливість налаштування ефективних алгоритмів кешування, які можуть значно мінімізувати затримки і покращити загальну продуктивність систем [23].

З метою оцінювання впливу кешування на продуктивність серверних додатків, побудованих на фреймворці NestJS, було проведено емпіричне дослідження. Для цього було використано інструменти тестування навантаження та моніторингу, які забезпечили збір точних даних про швидкість оброблення HTTP-запитів і використання системних ресурсів. Тестування проводилося у двох режимах: без застосування кешування та з його використанням. Такий підхід дозволив виявити відмінності в продуктивності та ефективності оброблення запитів, що було проаналізовано на основі зібраних показників.

Експеримент відбувався в умовах високого навантаження на сервер, що дозволило отримати релевантні дані для оцінювання реальних сценаріїв використання. Запитів до сервера було здійснено достатньо для точного порівняння часу оброблення та рівня споживання ресурсів. За допомогою Apache JMeter було забезпечено одночасну генерацію великої кількості запитів, що імітувало високий трафік, а Datadog дозволив відслідковувати зміни в продуктивності додатка в режимі реального часу (табл. 3).

Дані, отримані під час експерименту, чітко демонструють ефективність кешування в підвищенні продуктивності додатка. Без кешування середній час виконання HTTP-запитів становив близько 1,5 секунд, тоді як із застосуванням кешу цей час скоротився до 0,15 секунди, що становить приблизно 90% зменшення. Це свідчить про значне покращення швидкості оброблення запитів, що особливо важливо в умовах високого навантаження на сервер.

Крім того, кількість звернень до бази даних зменшилася майже на 95%, що знижує навантаження на серверні ресурси і дозволяє оптимізувати роботу системи. Рівень використання центрального процесора також знизився майже наполовину, що дозволяє зробити висновок про більш ефективне використання ресурсів під час кешування. Споживання оперативної пам'яті зменшилося на третину, що свідчить про стабілізацію використання системних ресурсів.

Ці результати показують значну ефективність кешування в контексті підвищення продуктивності серверних додатків, що робить його невід'ємною частиною стратегії оптимізації вебсервісів, особливо тих, які працюють у реальному часі. Кешування є потужним інструментом для підвищення продуктивності серверних додатків, але його ефективне впровадження вимагає комплексного підходу, що враховує специфіку застосовуваних технологій та архітектуру системи. Основними проблемами під час впровадження кешування є можливість некоректного налаштування, що може призвести до розбалансування навантаження на ресурси, неефективного використання пам'яті або до затримок через часті оновлення кешованих даних. Більш складними є питання забезпечення консистентності даних у розподілених системах, де кешування може спричинити невідповідності через асинхронність оновлень. Крім того, важливим аспектом є контроль і управління застарілими даними, що може впливати на цілісність і достовірність інформації, яку обробляє додаток [24; 25]. Ці проблеми потребують стратегічних рішень, орієнтованих на комплексну оптимізацію системи (табл. 4).

Запропоновані рекомендації відображають сучасні підходи до розроблення і впровадження стратегій кешування в умовах високонавантажених серверних додатків. Інтеграція розподіленого кешу на рівні мікросервісної архітектури дозволяє ефективно балансувати навантаження між серверами, забезпечуючи вищу масштабованість системи та її стійкість до пікових навантажень.

Таблиця 3

Порівняльний аналіз продуктивності серверного додатка на базі NestJS з використанням та без використання кешування

Параметр	Без кешування	З кешуванням	Різниця
Середній час виконання запитів	1,5 сек.	0,15 сек.	~90% зменшення
Навантаження на CPU	85%	45%	~47% зниження
Кількість звернень до бази даних	1000 запитів	50 запитів	~95% зменшення
Споживання оперативної пам'яті	1,8 ГБ	1,2 ГБ	~33% зниження

Джерело: авторська розробка

Таблиця 4

Рекомендації щодо впровадження стратегій кешування для високонавантажених серверних додатків

Рекомендація	Обґрунтування	Потенційні проблеми та стратегії їх розв'язання
Інтеграція розподіленого кешу на рівні мікросервісної архітектури	Підвищує масштабованість і знижує навантаження на окремі вузли системи	Може ускладнити забезпечення консистентності даних, що вирішується застосуванням стратегій «write-through» та «read-through»
Використання адаптивного кешування на основі аналітики реального часу	Забезпечує гнучке налаштування кешу залежно від навантаження і потреб	Вимагає інтеграції складних алгоритмів, що може збільшити навантаження на систему в моменти пікових звернень
Впровадження стратегій кешування на стороні клієнта та на рівні CDN	Знижує навантаження на сервер та оптимізує доставку контенту для глобальних користувачів	Можливі проблеми з актуальністю кешованих даних у різних географічних точках, що вирішується налаштуванням політик TTL (time-to-live)
Автоматизація управління кешем з використанням машинного навчання	Оптимізує управління ресурсами та підвищує продуктивність через автоматизовані рішення	Складність запровадження та потреба в значних ресурсах для навчання моделей, що може бути оптимізовано через поетапне впровадження і тестування

Джерело: авторська розробка

Однак така архітектура може стикатися з проблемами консистентності даних, які розв'язуються шляхом використання стратегій «write-through» та «read-through», що забезпечують узгодженість між кешем та основною базою даних.

Адаптивне кешування на основі аналітики реального часу надає можливість динамічно підлаштовувати стратегії кешування залежно від поточного стану системи і навантаження. Це дозволяє уникати надмірних оновлень кешу або недоцільного використання системних ресурсів, проте вимагає інтеграції складних алгоритмів аналітики, що може стати додатковим викликом для розробників.

Впровадження кешування на стороні клієнта і на рівні CDN значно підвищує ефективність серверних додатків, особливо в умовах глобальних мереж, де доступ до контенту може бути сповільнений через віддаленість користувача. Однак проблема актуальності кешованих даних залишається важливою, і її можна розв'язати налаштуванням точних політик часу життя кешу (TTL), що дозволяє системі автоматично очищати старі дані з кешу.

Найбільш інноваційною стратегією є використання машинного навчання для автоматизації управління кешем [9], що дозволяє системі навчатися на основі історичних даних та оптимізувати кешування в реальному часі. Це забезпечує максимальну ефективність використання ресурсів та мінімізує втрати продуктивності. Однак упровадження таких рішень є ресурсомістким процесом, що потребує поетапного підходу для успішної інтеграції та тестування ефективності алгоритмів у реальних умовах експлуатації.

Очікується, що ці стратегії дозволять значно підвищити продуктивність серверних додатків завдяки оптимізації використання ресурсів, покращення масштабованості та мінімізації часу оброблення запитів.

Висновки. Емпіричні дослідження довели, що використання стратегій кешування суттєво підвищує продуктивність серверних додатків, зокрема на фреймворці NestJS. Встановлено, що кешування зменшує середній час оброблення HTTP-запитів з 1,5 секунд до 0,15 секунди, що свідчить про приблизно 90% скорочення. Це також призводить до значного зменшення кількості звернень до бази даних і зниження навантаження на процесор, яке в середньому зменшується на 47%. Основними проблемами, що були виявлені під час дослідження, є складність у забезпеченні консистентності даних, особливо в умовах використання розподіленого кешу, а також необхідність коректного налаштування механізмів оновлення кешу для уникнення зберігання застарілої інформації. Використання адаптивного кешування і стратегій кешування на основі часу життя даних дозволяє розв'язати ці проблеми, забезпечуючи актуальність даних і оптимізацію використання ресурсів. Проте їх впровадження вимагає додаткових обчислювальних потужностей і ретельного налаштування.

Рекомендується інтеграція розподіленого кешу на рівні мікросервісної архітектури, що

дозволить підвищити масштабованість додатків і ефективно балансувати навантаження на систему. Використання стратегії «write-through» та «read-through» може мінімізувати ризики неконсистентності даних у системах з великою кількістю вузлів. Іншою перспективною стратегією є впровадження автоматизації управління кешем за допомогою машинного навчання, що дозволить оптимізувати використання кешу на основі реальних даних і прогнозів навантаження. Це також дасть змогу значно знизити витрати на підтримку інфраструктури та підвищити ефективність використання серверних ресурсів.

Подальші дослідження мають бути зосереджені на інтеграції цих стратегій в умовах динамічних середовищ, а також на дослідженні їх впливу на продуктивність серверних додатків у реальних сценаріях використання.

Список літератури:

1. Prasad M., Padma U. Performance Analysis of ExpressJS and Fastify in NestJS. In: International Conference on Robotics, Control, Automation and Artificial Intelligence. Singapore: Springer Nature Singapore. 2022. P. 1037-1049. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-99-4634-1_82#citeas (date of access: 17.10.2024)

2. Zima B., Barszcz M. Comparative analysis of Node.js frameworks. *Journal of Computer Sciences Institute.* 2024. Vol. 30. P. 26-30. DOI: https://doi.org/10.35784/jcsi.5364 (date of access: 17.10.2024)

3. Golec M., Plechawska-Wójcik M. Comparative analysis of frameworks using TypeScript to build server applications. *Journal of Computer Sciences Institute.* 2022. Vol. 23. P. 128-134. DOI: https://doi.org/10.35784/jcsi.2910 (date of access: 17.10.2024)

4. Zulfa M., Hartanto R., Permanasari A. Caching strategy for Web application – a systematic literature review. *International Journal of Web Information Systems.* 2020. Vol. 16. No. 5. P. 545-569. DOI: https://doi.org/10.1108/IJWIS-06-2020-0032 (date of access: 17.10.2024)

5. Zahed M. Ishtiaque A., et al. A review on green caching strategies for next generation communication networks. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 212709-212737. DOI: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9272291 (date of access: 17.10.2024)

6. Naeem M., Rehman M., Ullah R., Kim B. A Comparative Performance Analysis of Popularity-Based Caching Strategies in Named Data Networking. *IEEE Access.* 2020. Vol. 8. P. 50057-50077. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2980385 (date of access: 17.10.2024)

7. Naeem M., et al. Compound popular content caching strategy in named data networking. *Electronics.* 2019. Vol. 8. No. 7. P. 771. DOI: https://doi.org/10.3390/electronics8070771 (date of access: 17.10.2024)

8. Zhao L., Li H., Lin N., Lin M., Fan C., Shi J. Intelligent Content Caching Strategy in Autonomous Driving Toward 6G. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.* 2022. Vol. 23. No. 7. P. 9786-9796. DOI: 10.1109/TITS.2021.3114199 (date of access: 17.10.2024)

9. Shuja J., et al. Applying machine learning techniques for caching in next-generation edge networks: A comprehensive survey. *Journal of Network and Computer Applications.* 2021. Vol. 181. P. 103005. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jnca.2021.103005 (date of access: 17.10.2024)

10. Chen C., Jiang J., Fu R., Chen L., Li C., Wan S. An Intelligent Caching Strategy Considering Time-Space Characteristics in Vehicular Named Data Networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.* 2022. Vol. 23. No. 10. P. 19655-19667. DOI: 10.1109/TITS.2021.3128012 (date of access: 17.10.2024)

11. Beckmann A., Bollmann M., Buchholz T., Geiser R., Kerpen D., Conrad J. Development of a Digital Collaborative Whiteboard. In: Stephanidis C., Antona M., Ntoa S. (eds) HCI International 2021 - Late Breaking Posters. HCII 2021. Communications in Computer and Information Science, vol. 1499. Springer, Cham. 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-90179-0_31 (date of access: 17.10.2024)

12. Kušević T., Blažević D., Keser T. Comparison Functionalities of HTTP and MQTT Protocols. In: 31st International Conference on Organization and Technology of Maintenance (OTO, 2022). OTO 2022. Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 592. Springer, Cham. 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-21429-5_5 (date of access: 17.10.2024)

13. Li C. et al. Collaborative caching strategy based on optimization of latency and energy consumption in MEC. *Knowledge-Based Systems.* 2021. Vol. 233. P. 107523. DOI: https://doi.org/10.1016/j.knosys.2021.107523 (date of access: 17.10.2024)

14. Кешування в NestJS, офіційна документація. URL: https://docs.nestjs.com/techniques/caching (дата звернення: 17.10.2024).

15. Кешування в Node.js, офіційна документація. URL: https://nodejs.org/docs/v20.17.0/api/modules.html#caching (дата звернення: 17.10.2024).

16. How to use Redis for Query Caching. URL: https://redis.io/learn/howtos/solutions/microservices/caching (дата звернення: 17.10.2024).

17. Офіційна документація npm пакету cache-manager. URL: https://www.npmjs.com/package/cache-manager (дата звернення: 17.10.2024).

18. Getting Started with Monitors, Datadog Docs. URL: https://docs.datadoghq.com/getting_started/monitors/ (дата звернення: 17.10.2024).

19. Набір інструментів для побудови API на основі NestJS. URL: https://docs.nestjs.com/controllers (дата звернення: 17.10.2024).

20. Керівництво по використанню Apache JMeter для тестування навантаження. JMeter User Manual. URL: https://jmeter.apache.org/usermanual/index.html (дата звернення: 17.10.2024).

21. Покроковий гайд по використанню Apache JMeter для тестування навантаження. Apache JMeter Distributed Testing Step-by-step. URL: https://jmeter.apache.org/usermanual/jmeter_distributed_testing_step_by_step.html (дата звернення: 17.10.2024).

22. Node.js Caching and Database Optimization for High-Performance APIs. URL: https://medium.com/@techsuneel99/node-js-caching-and-database-optimization-for-high-performance-apis-219f5280923b (дата звернення: 17.10.2024).

23. Leveraging Redis Cache: Optimizing Database Costs and Enhancing Application Performance. URL: https://medium.com/cloud-native-daily/leveraging-redis-cache-optimizing-database-costs-and-enhancing-application-performance-64b1df337530 (дата звернення: 17.10.2024).

24. Abolhassani B. et al. Fresh caching for dynamic content. IEEE INFOCOM 2021-IEEE Conference on Computer Communications. 2021. P. 1–10. URL: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9488731 (date of access: 17.10.2024)

25. Huang, X., Song, F., Ye, Y., Yang, X., Li, X. Fair and efficient caching algorithms and strategies for peer data sharing in pervasive edge computing environments. *IEEE Transactions on Mobile Computing.* 2020. Vol. 19(4). P. 852–864. DOI: 10.1109/TMC.2019.2902090 (date of access: 17.10.2024)

Borovskova Ye.A. DETERMINING OPTIMAL CACHING STRATEGIES FOR IMPROVING PERFORMANCE OF SERVER APPLICATIONS ON NESTJS

The article is dedicated to studying the performance of server applications in modern information systems that process large volumes of data in real time. The need to enhance performance for maintaining the stability of these applications under high-load conditions is emphasized, as it is crucial for resource optimization and reducing query processing time. It has been established that cache management is one of the most effective strategies, which reduces database access frequency, decreases CPU load, and shortens query processing time.

The article also highlights modern caching approaches and assesses their impact on the performance of server systems based on the NestJS framework. The research process included load testing methods, such as Apache JMeter, to simulate high-load environments, along with monitoring tools like Datadog for real-time caching efficiency assessment. Findings show that implementing caching reduces the average query processing time by 90%, halves CPU load, and decreases database access by 95%, thereby improving application performance and reducing infrastructure costs, particularly by lowering RAM and CPU resource consumption.

The importance of selecting appropriate caching strategies based on request specifics and available system resources is also defined. The efficiency of adaptive caching based on real-time analytics and TTL-based caching, which enables dynamic system adjustment for optimal performance, is highlighted. The need for careful analysis and configuration is stressed to avoid issues with stale data and ensure data consistency.

The article also analyzes the impact of selected caching strategies on infrastructure cost optimization. Results confirm that implementing modern cache management approaches significantly enhances the performance and stability of server applications under high-load conditions. Future research prospects include exploring machine learning integration for automated cache management, which could further optimize resource utilization based on historical data analysis and system load forecasting.

Key words: *performance optimization, server applications, cache management, data processing efficiency, storage strategies.*

УДК 004.67:004.62
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/04

Гаращук Б.В.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ IOT-МЕРЕЖ НА ОСНОВІ БЛОКЧЕЙН ТЕХНОЛОГІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ПОЛЕГШЕНОГО АЛГОРИТМУ КОНСЕНСУСУ

У статті розглядається проблема оптимізації IoT-мереж з використанням блокчейн-технології для забезпечення безпеки та підвищення ефективності в умовах обмежених ресурсів IoT пристроїв. Пропонується застосування полегшеного алгоритму консенсусу Delegated Proof of Stake (DPoS), що дозволяє зменшити навантаження на мережу порівняно з традиційними методами, такими як Proof of Work (PoW) та Proof of Stake (PoS). Запропонована архітектура включає використання локальних та публічних блокчейнів для зберігання даних, що дає змогу оптимізувати процес зберігання і обміну даними серед численних пристроїв IoT. Така комбінація технологій забезпечує ефективне управління даними в умовах високої кількості пристроїв та обмежених ресурсів. В рамках дослідження запропоновано модель мережі IoT, в якій використовуються "розумні" шлюзи для інтеграції з блокчейном, що полегшує комунікацію між пристроями з низькими обчислювальними можливостями та більш потужними вузлами консенсусу. Таким чином, блокчейн здатен забезпечити високу безпеку, захист даних від несанкціонованих змін, а також підвищену пропускну здатність завдяки розподіленій архітектурі. Експериментальні результати показують, що DPoS демонструє значно кращу продуктивність, зокрема меншу затримку (менше 1 мс) та вищу пропускну здатність у порівнянні з PoS. Це робить запропоновану систему ефективною для застосувань у сфері IoT, де необхідні низька затримка, ефективне використання обмежених ресурсів та масштабованість. Використання DPoS дозволяє досягти значної економії енергоресурсів, знижує витрати на обробку даних і покращує масштабованість системи, що робить її оптимальним вибором для широкого застосування в таких галузях, як фінанси, охорона здоров'я, енергетика та інші важливі сфери, де критично важливо зберігати безпеку та конфіденційність, одночасно зберігаючи високу продуктивність і ефективність.

Ключові слова: *блокчейн, алгоритм консенсусу, IoT, смарт-контракт, DPoS.*

Постановка проблеми. Масштабованість IoT пристроїв, стабільно зростає, з кожним роком і до 2030, згідно з дослідженнями може сягнути близько 30 мільярдів девайсів [1]. Їх економічна дешевизна та підтримка сучасних інформаційних технологій, зробило масове використання IoT мереж в різних галузях, таких як охорона здоров'я, «розумні будинки», промисловість, енергетичні мережі і т.д. [8].

Більшість систем що вже впроваджені, та створюються зараз, традиційно створені на основі централізованої інфраструктури. Основною характеристикою цього підходу є, те що дані збирають і обробляються через центральний сервер.

Такий підхід має ризики пов'язані з безпекою та конфіденційністю через можливі кібератаки [2; 6]. Застосування блокчейну є ефективним рішення для забезпечення безпеки мереж IoT. Блокчейн – цифровий розподілений реєстр, використовуючи децентралізацію та криптографічні алгоритми для захисту, він може забезпечити безпеку IoT пристроїв [2]. Блокчейн створюючи ланцюги блоків, унеможливлює підміну даних, оскільки в наступному блоці записується хеш попереднього, для змінення даних потрібно змінювати кожен блок.

Децентралізована природа блокчейну також сприяє підвищенню стійкості мережі до збоїв та атак. Оскільки копії реєстру зберігаються на багатьох вузлах мережі, відмова одного або кількох вузлів не впливає на загальну працездатність системи. Крім того, будь-які спроби несанкціонованої зміни даних можуть бути легко виявлені іншими учасниками мережі.У контексті IoT мереж, інтеграція блокчейну може забезпечити безпечну та ефективну передачу даних між пристроями без необхідності довіряти центральному вузлу. Це дозволяє знизити ризики, пов'язані з централізацією, та забезпечити вищий рівень безпеки та конфіденційності.

Однак, застосування блокчейну в IoT також має свої виклики. Одним з основних є масштабованість блокчейн мережі, оскільки збільшення

кількості транзакцій може призвести до затримок та зростання витрат на обробку. Також важливо враховувати обмежені ресурси IoT пристроїв, такі як енергія та обчислювальна потужність, які можуть бути достатніми для роботи з деякими блокчейн протоколами.

Для подолання цих викликів розробляються спеціалізовані блокчейн рішення, оптимізовані для IoT. Вони включають використання легких консенсусних алгоритмів, які потребують менше ресурсів, та впровадження механізмів, що дозволяють зменшити навантаження на мережу.У підсумку, блокчейн має потенціал значно покращити безпеку та ефективність IoT мереж, проте для повного розкриття цього потенціалу необхідно продовжувати дослідження та розробку технологій, що враховують специфічні вимоги та обмеження IoT середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зі зростанням популярності блокчейну технологія стикається з проблемою масштабування, особливо коли мова йде про зберігання та обробку великих обсягів даних. Це призводить до зниження продуктивності системи, оскільки мережа, що перевіряє транзакції, стає більш складною і не здатна обробляти велику кількість транзакцій одночасно. Це особливо актуально для алгоритмів консенсусу, таких як Proof of Work (PoW) та Proof of Stake (PoS), які мають обмежену пропускну здатність і можуть створювати вузькі місця в мережі.

Алгоритм консенсусу – це набір правил та протоколів, за допомогою яких учасники блокчейн-мережі досягають згоди щодо поточного стану системи та історії її транзакцій. Основними функціями алгоритму консенсусу є:

1. Перевірка транзакцій: Забезпечення того, щоб всі транзакції в мережі були дійсними та відповідали встановленим правилам. Це включає перевірку підписів, балансу та відсутності подвійного витрачання.

2. Додавання нових блоків: Визначення механізму, за яким нові блоки додаються до ланцюга, коли з'являються нові транзакції. Алгоритм визначає, який учасник має право додати наступний блок, та як це рішення приймається.

3. Управління відмовами та конфліктами: Якщо виникають конфлікти або різні учасники мають різну інформацію, консенсусний алгоритм визначає, яка з версій є правильною, забезпечуючи цілісність та послідовність блокчейну.

Основними алгоритмами консенсусу є Proof of Work та Proof of Stake. Розглянемо детальніше кожен з них, їхні переваги та недоліки.

Proof of Work (PoW) – це перший і найпоширеніший алгоритм консенсусу, який використовується в багатьох блокчейн-мережах, включаючи Bitcoin [2]. Учасники мережі, відомі як майнери, повинні виконувати складні обчислювальні задачі для того, щоб додати новий блок до блокчейну [4]. Ці задачі зазвичай включають пошук хешу з певними властивостями, що відповідає вимогам мережі. Майнери змагаються між собою, щоб першим знайти правильне рішення, і той, хто успішно вирішує задачу, отримує винагороду у вигляді криптовалюти.

Переваги PoW:

– Високий рівень безпеки: Завдяки складним обчисленням і необхідності виконання великої кількості операцій для додавання кожного блоку, PoW робить систему захищеною від атак. Зокрема, для того щоб зловмисник зміг змінити історію транзакцій, йому потрібно мати більше 50% обчислювальної потужності мережі, що є вкрай складним завданням.

– Децентралізація: Усі учасники можуть брати участь у процесі майнінгу, що підтримує децентралізований характер мережі. Це забезпечує відсутність єдиного центру контролю та підвищує стійкість до цензури.

Недоліки PoW:

– Високі витрати на енергію та обчислювальні ресурси: Для обробки транзакцій та додавання нових блоків потрібен великий обсяг енергії. Це призводить до значних екологічних проблем та збільшує витрати на підтримку мережі.

– Масштабованість: Час на створення нового блоку в PoW може бути великим (наприклад, 10 хвилин у Bitcoin), що обмежує кількість транзакцій, які можуть бути оброблені за секунду. Це робить систему менш ефективною для використання в масштабних проектах, де необхідна висока пропускна здатність.

Proof of Stake (PoS) – це альтернативний алгоритм консенсусу, який замінює обчислювальні завдання PoW на принцип володіння часткою в мережі. У PoS учасники, які мають більше токенів або «ставок» (stakes), мають більший шанс бути вибраними для перевірки транзакцій і додавання нових блоків до блокчейну. Це означає, що стимул для підтримки мережі базується на власності токенів, а не на обчислювальній потужності.

Переваги PoS:

– Масштабованість: PoS дозволяє значно швидше додавати нові блоки до блокчейну, що збільшує пропускну здатність мережі. Це робить її більш придатною для додатків, де необхідна швидка обробка великої кількості транзакцій.

– Безпечність: Зловмисник повинен володіти значною кількістю токенів, щоб здійснити атаку на систему, що робить такі атаки економічно невигідними. Це підвищує загальну безпеку мережі.

– Енергоефективність: Оскільки немає потреби у виконанні складних обчислень, енергоспоживання мережі значно знижується, що позитивно впливає на екологію та зменшує витрати.

Недоліки PoS:

– Ризик концентрації влади: Якщо одна особа чи група володіє більшістю монет, вони можуть отримати не пропорційну кількість голосів для валідації блоків, що може призвести до централізації. Це суперечить основному принципу децентралізації блокчейну.

– Менша перевіреність: У порівнянні з PoW, PoS є новішим алгоритмом, і деякі експерти вважають його менш перевіреним на практиці. Існують побоювання щодо потенційних вразливостей та стабільності системи в довгостроковій перспективі.

Значні обчислювальні вимоги цих алгоритмів, особливо в PoW, роблять їх не практичними для IoT пристроїв з обмеженими ресурсами [5][7]. Більшість IoT-пристроїв мають обмежену обчислювальну потужність, пам'ять та енергетичні ресурси, що унеможливлює ефективне використання цих алгоритмів без шкоди для їх основних функцій.

Тому наш метод використовує альтернативний консенсус, відомий як Delegated Proof of Stake (DPoS). У цьому алгоритмі лише обрана кількість делегатів перевіряє транзакції та додає блоки. Учасники мережі голосують за делегатів, які представлятимуть їх інтереси в процесі валідації блоків. Це дозволяє збільшити швидкість обробки транзакцій та знизити навантаження на мережу.

Переваги DPoS:

– Висока продуктивність: Зменшення кількості вузлів, які беруть участь у консенсусі, дозволяє значно збільшити швидкість підтвердження транзакцій та додавання нових блоків. Це особливо важливо для мереж з великою кількістю транзакцій.

– Енергоефективність: Оскільки тільки вибрані делегати виконують обробку транзакцій, загальне енергоспоживання мережі знижується. Це робить DPoS більш придатним для пристроїв з обмеженими ресурсами, таких як IoT.

– Гнучкість: Учасники мережі можуть легко змінювати делегатів через механізм голосування, що забезпечує адаптивність та стійкість до зловживань з боку делегатів.

DPoS є більш підходящим для IoT-пристроїв завдяки своїй енергоефективності та швидкості. Оскільки IoT-пристрої часто мають обмежені ресурси та потребують швидкої обробки даних, DPoS забезпечує необхідний баланс між безпекою та продуктивністю.

У DPoS IoT-пристрої можуть діяти як звичайні учасники, делегуючи свої права перевірки транзакцій більш потужним вузлам. Це дозволяє знизити вимоги до обчислювальних ресурсів та енергії на самих пристроях, що є критичним для їхнього функціонування.

Переваги DPoS для IoT:

– Зменшення навантаження: Пристрої не повинні виконувати складні обчислення, що продовжує їхній термін роботи від батареї та зменшує знос обладнання.

– Швидкість транзакцій: Підвищена швидкість обробки транзакцій дозволяє в реальному часі реагувати на події та зміни, що важливо для багатьох IoT-застосувань.

– Масштабованість: DPoS може підтримувати велику кількість пристроїв та транзакцій без значного зниження продуктивності мережі.

Проблеми масштабування та продуктивності є серйозними перешкодами для інтеграції блокчейну в IoT-системи. Традиційні алгоритми консенсусу, такі як PoW та PoS, не відповідають вимогам IoT-пристроїв через високі обчислювальні вимоги та енергоспоживання. Використання альтернативного алгоритму консенсусу DPoS пропонує ефективне рішення цих проблем.

DPoS забезпечує необхідну продуктивність та енергоефективність, дозволяючи IoT-пристроям взаємодіяти з блокчейн-мережею без перевищення їхніх ресурсних можливостей. Хоча існують ризики, пов'язані з централізацією та залежністю від голосування, правильне налаштування та активна участь спільноти можуть мінімізувати ці недоліки.

Таким чином, DPoS представляє собою перспективний напрямок розвитку блокчейн-технологій для IoT, що може значно покращити безпеку, продуктивність та масштабованість мереж, відкриваючи нові можливості для інновацій та інтеграції в різних галузях.

Постановка завдання. Метою даної статті є аналіз існуючих підходів до використання блокчейну та алгоритмів консенсусу в IoT мережах, виявлення основних недоліків і моделювання архітектури системи з використанням полегшеного консенсусу, яка підвищує безпеку та продуктивність в умовах обмежених ресурсів IoT пристроїв.

Виклад основного матеріалу. Запропонована система організована таким чином, що IoT

пристрої використовують, для взаємодії з блокчейном, «розумні» шлюзи. Вони допомогають подолати розрив між обмеженими можливостями пристроїв і смарт контрактами блокчейну. Також ми використовуємо. IoT вузли збирають дані та надсилають їх до локального блокчейну на визначених користувачем інтервалах. А вузли консенсусу, ще крім збору даних, також використовують алгоритм консенсусу DPoS. Обидва види вузлів, не мають потреби у високих обчислювальних вимогах завдяки застосованому консенсусу.

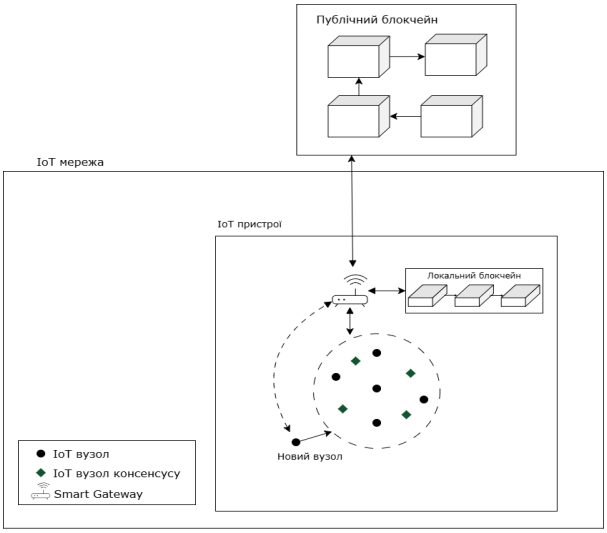


Рис. 1. Архітектура запропонованої системи

Коли новий вузол хоче приєднатись до мережі, шлюз полегшує комунікацію з вузлами консенсусу. З доступного набору вузлів обирається валідатор, котрий визначається за його обчислювальною потужністю та функціонуванням.

Використовуючи подвійну блокчейн-систему, що складається з локального блокчейну та публічного блокчейну, спеціально розробленого для обмежених IoT пристроїв. Локальний блокчейн тимчасово зберігає всі IoT дані, функціонуючи як буфер, що містить хеш-адреси та ідентифікаційні реєстри, які вказують на місця зберігання даних у публічному блокчейні, що виступає як централізований реєстр. Публічний блокчейн таким чином слугує постійним сховищем для усього потоку IoT даних, що передаються через всю IoT інфраструктуру.

Публічний блокчейн функціонує як децентралізована мережа, що складається з окремих вузлів, кожен з яких містить повну копію всієї системи. Такий підхід забезпечує стійкість системи, навіть якщо значна частина вузлів мережі стає недоступною або втрачаються дані. У таких випадках систему можна повністю відновити, використовуючи лише один вузол із повною копією блокчейну.

Оцінка ефективності, складається з кількох етапів, таких як валідація додавання даних до блоку та вимірювання пропускної здатності.

Затримка – показує час який потрібен для того щоб пакет досягнув шлюзу та став частиною блокчейну. Чим вище показник тим більша складність додавання пакеті даних до блоку.

Тестові налаштування були такими, загальна кількість вузлів від 500 до приблизно 2000. Розмір блоку, що вміщує пакети даних – 1МБ, а розмір корисного навантаження – 50 Байт. Рисунок 2 демонструє результати. При застосування алгоритму PoS, затримка зростала. Наприклад, для 500 вузлів, у консенсусу PoS затримка складає – 50 мс, в той же час DPoS демонструє близько 1 мс. Пояснити це можна тим, що у PoS – процес валідації для окремого пакету даних затягнутий через відсутність миттєвого виконання та більший пул валідації. В результаті ці пакети даних ставляться в чергу на валідацію та подальше додавання до блоків.

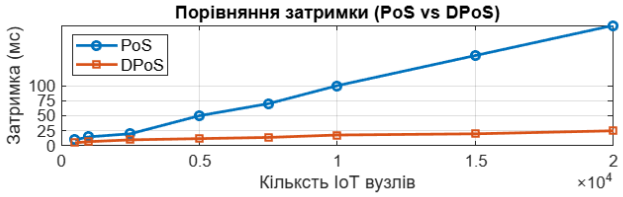


Рис. 2. Порівняння часу затримки між системами з PoS та DpoS

Пропускна здатність – вимірюється кількістю успішних транзакцій від першої транзакції до останньої в ланцюзі блоків. Показує кількість вузлів IoT блокчейну на шлюз. З результатами можна ознайомитись на рисунку 3. В цьому випадку різницю можна пояснити, тим підхід PoS насичується раніше, не досягаючи більш високої пропускної здатності.

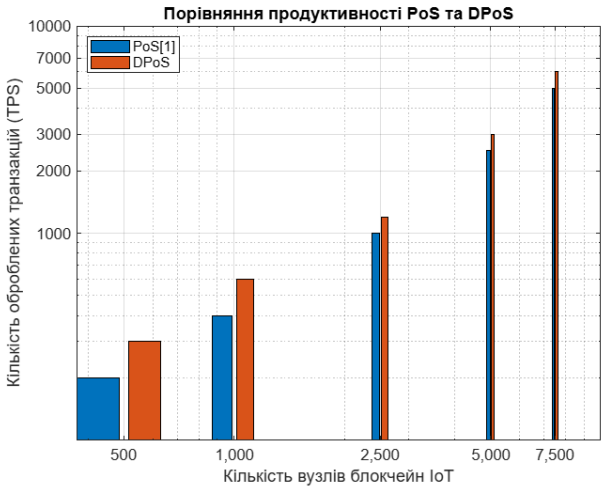


Рис. 3. Порівняння пропускної здатності системами з PoS та DpoS

Висновки. Таким чином, запропонована система досягає кінцевої безпеки через механізми верифікації та валідації, що залучають обраних делегатів, щоб зменшити проблеми з деградацією продуктивності на пристроях. Експериментальні результати показують, що DPoS перевершує PoS за показниками пропускної здатності та латентності на пристроях IoT. Ми також демонструємо, що підхід DPoS корисний для застосувань IoT, де необхідніа ефективне використання ресурсів. Завдяки цим показникам рішення може бути застосовано у фінансовій та медичній галузях. Крім того, низька вартість є критично важливою для широкого впровадження блокчейн-технологій для безпечного управління та зберігання даних у середніх та великих організаціях.

Список літератури:

1. Holst A. IoT Connected Devices Worldwide 2022–2030 Statista. 2024. URL: https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/ (дата звернення: 15.11.2024).

2. Nakamoto S. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. Bitcoin.org. – 2008. URL: https://bitcoin.org/bitcoin.pdf (дата звернення: 17.11.2024).

3. Buterin V. A Next-Generation Smart Contract and Decentralized Application Platform. Ethereum Whitepaper 2013. URL: https://ethereum.org/en/whitepaper/ (дата звернення: 18.11.2024).

4. Md Sadek Ferdous, Mohammad Jabed Morshed Chowdhury, Mohammad A. Hoque, Alan Colman. Blockchain Consensus Algorithms: A Survey. arXiv. – 2020.Pp. 1–32. URL: https://arxiv.org/abs/2001.07091 (дата звернення: 19.11.2024).

5. Larimer D. Delegated Proof-of-Stake (DPoS). BitShares 2014. URL: https://bitshares.org/technology/delegated-proof-of-stake-consensus/ (дата звернення: 19.11.2024).

6. Mollah S.M., Azad M.A.K., Vasilakos A.V. Comparison of PoS and DPoS Consensus Algorithms in Blockchain. Journal of Electrical Engineering and Technology. 2020 Vol. 15, No. 6. Pp. 3067–3074. URL: https://doi.org/10.1007/s42835-020-00536-0 (дата звернення: 19.11.2024).

7. Chan S.C.Y., Chow K.P., Wong D.S., et al. Blockchain for Internet of Things: A Survey // IEEE Internet of Things Journal 2019. Vol. 6, No. 5. Pp. 8076–8094. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8731639 (дата звернення: 20.11.2024).

8. Li R.Y.K., Chau K.W., Tsai C.W., et al. A Hybrid Blockchain Architecture for Secure IoT Communication. Future Generation Computer Systems. 2019. Vol. 96. Pp. 481–489. URL: https://doi.org/10.1016/j.future.2019.02.049 (дата звернення: 20.11.2024).

Garashchuk B.V. A METHOD FOR OPTIMIZING IoT NETWORKS BASED ON BLOCKCHAIN TECHNOLOGY USING A LIGHTENED CONSENSUS ALGORITHM

The article considers the problem of optimizing IoT networks using blockchain technology to ensure security and increase efficiency in the context of limited resources of IoT devices. The paper proposes the use of a lightweight Delegated Proof of Stake (DPoS) consensus algorithm that reduces the load on the network compared to traditional methods such as Proof of Work (PoW) and Proof of Stake (PoS). The proposed architecture includes the use of local and public blockchains for data storage, which allows optimizing the process of storing and exchanging data among numerous IoT devices. This combination of technologies ensures efficient data management in the context of a high number of devices and limited resources. The study proposes a model of the IoT network that uses smart gateways to integrate with the blockchain, which facilitates communication between devices with low computing capabilities and more powerful consensus nodes. Thus, the blockchain is able to provide high security, data protection against unauthorized changes, and increased throughput due to its distributed architecture. Experimental results show that DPoS demonstrates significantly better performance, including lower latency (less than 1 ms) and higher throughput compared to PoS. This makes the proposed system effective for IoT applications that require low latency, efficient use of limited resources, and scalability. The use of DPoS allows for significant energy savings, reduces data processing costs, and improves system scalability, making it the optimal choice for widespread use in industries such as finance, healthcare, energy, and other critical areas where it is critical to maintain security and privacy while maintaining high performance and efficiency.

Key words: *blockchain, consensus algorithm, IoT, smart contract, DPoS.*

УДК 004.75
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/05

Гіоргізова-Гай В.Ш.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кирюша Б.А.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ХМАРНІ ПОСЛУГИ В КОРПОРАТИВНІЙ ІНФРАСТРУКТУРІ

У статті проводиться аналіз звітів від всесвітньо відомих організацій та компаній про стан ринку застосування хмарних технологій, аналіз пропозицій світових та регіональних сервіс-провайдерів, які пропонують послуги в Україні. На основі цього аналізу надається порівняння можливостей, переваг та обмежень різних хмарних підходів до побудови сучасної корпоративної інфраструктури організацій, розглядаються проблеми впровадження приватних, гібридних і мультихмарних технологій та шляхи подолання цих проблем. Сучасні компанії поширюють застосування хмарних технологій для отримання конкурентних переваг на ринку. Досвід тривалого використання публічних хмар виявив ряд їх недоліків: обмеженість безпеки та контролю, складність з дотриманням нормативних вимог, високі затримки, обмеженість налаштувань, залежність від провайдера та неконтрольовані зростання витрат. А при побудові хмар власними силами на локальних ресурсах організації зіткнулися з нестачею кваліфікованих кадрів для її підтримки, з проблемами обмежень наявної інфраструктури та зі зростанням витрат на обслуговування. Як відповідь на ці виклики світовими та регіональними сервіс-провайдерами були запропоновані послуги по розгортанню приватних хмар в ізольованому середовищі на орендованій або локальній інфраструктурі замовників та гібридних хмар, які дозволяють поєднати переваги приватних і публічних хмар, щоб досягти балансу між гнучкістю, контролем та інноваціями Впровадження цих хмарних стратегій змінює підходи до побудови корпоративної інфраструктури і стає все більш популярним з року в рік. Але впровадження цих підходів поряд з перевагами також може спричинити компаніям чимало проблем. Проте, проблеми можна подолати, якщо організація добре усвідомлює особливості різних хмарних підходів, має продуману стратегію і архітектурне рішення для розгортання хмари, а також досвідчених партнерів. Дана стаття спрямована на те, щоб допомогти організаціям, які шукають нові рішення для успішності свого бізнесу, зробити правильний вибір.

Ключові слова: *хмарні технології, корпоративна інфраструктура, безпека даних, публічна хмара, приватна хмара, гібридна хмара.*

Постановка проблеми. Хмарні послуги міцно увійшли в наше життя і знаходять широке застосування в корпоративній інфраструктурі організацій. Проте застосування організаціями послуг, пов'язаних з багатохмарним підходом, як у світі, так і в Україні почало поширюватись відносно недавно. Закону України «Про хмарні послуги» [1] був прийнятий тільки у 2022 році. Організації ще не в повному обсязі усвідомлюють, як забезпечити максимальну ефективність від використання різних хмарних послуг, їх переваги і обмеження та шляхи уникнення можливих проблем. В пропозиціях провайдерів можна зустріти різні підходи до реалізації приватних та гібридних хмар та навіть дещо відмінну термінологію. Все це ускладнює вибір організацій, які шукають нові рішення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Хмарні технології сьогодні займають важливе місце в IT галузі, тому актуальний стан ринку їх застосування регулярно аналізується у звітах всесвітньо відомих організацій та компаній таких, як CNCF, Flexera, Mordor Intelligence та ін. [2–5], чиї постійні опитування охоплюють сотні підприємств з усього світу.

Всі звіти демонструють постійне зростання використання хмарних проектів у виробництві в опитуваних організаціях незалежно від їх розміру. Організації переходять на хмарні технології через їх масштабованість, економічність, високу доступність і широке охоплення, більш швидке розгортання та підвищення продуктивності праці розробників.

В той же час, серед головних проблем застосування хмарних технологій залишається управління витратами та безпека даних. За даними Flexera управління витратами на хмару вже дру-

гий рік поспіль займає перше місце (як головну проблему її визначили 84% організацій) і випереджає проблеми безпеки (81%).

Серед інших проблем, як і в попередні роки, респонденти відзначають брак ресурсів/експертів, проблеми з урядовими дозволами та погодженнями, з управлінням ліцензіями на ПЗ, з балансом відповідальності між центральною хмарною командою та корпоративною, з управлінням мультихмарою та міграцією в хмару.

Використання публічних хмар продовжує зростати. Провайдери всіх рівнів постійно розширюють набір пропонованих послуг та вдосконалюють існуючі. Проте проблеми і обмеження самого підходу залишаються. Для їх подолання пропонуються інші хмарні стратегії: приватна, багато хмарна та гібридна. Їх впровадження змінює підходи до побудови корпоративної інфраструктури.

Сьогодні в світі стратегія, при якій на підприємствах одночасно використовуються послуги декількох хмар одночасно стала вже нормою. Гнучкість цієї моделі дозволяє організаціям скористатися перевагами різних видів хмар, зменшити ризики, забезпечити масштабованість і оптимізацію ресурсів.

Так, за даними звіту Flexera 2024 року тільки 10% опитаних організацій задовольнялись послугами одного публічного провайдера і лише 1% – тільки власною мережевою інфраструктурою, а 89% застосовували багато хмарні рішення, з яких 73% склали гібридні хмари, 14% – з використанням кількох публічних без приватних та 2% – з використанням кількох приватних без публічних.

В термінології щодо видів розгортання хмарних послуг будемо орієнтуватись на визначення всесвітніх організацій і провідних провайдерів.

Публічна хмара. Загальнодоступні хмари є стандартним способом розгортання хмарних обчислень (cloud computing) [6]. У загальнодоступній хмарі обчислювальні ресурси, сховища даних, програмне забезпечення та мережева інфраструктура знаходяться у володінні та управлінні постачальника хмарних служб. Користувачі керують лише основними параметрами послуг. Провайдер відповідає за обслуговування ресурсів та гарантує доступність, надійність та безпеку за допомогою угод про рівень обслуговування SLA (Service Level Agreement).

Послуги надаються великій кількості незалежних користувачів на вимогу у міру потреби через Інтернет. В основі хмарного підходу лежить віртуалізація загальнодоступних ресурсів, які динамічно перерозподіляються між споживачами в умовах постійної зміни запиту на потужності, чим забезпечується швидке автоматичне масштабування обчислювальної системи. Ресурси можуть бути розміщені в одному або декількох дата-центрах. Служби надаються постачальником на основі трьох базових моделей: IaaS, (Infrastructure-as-a-Service) – інфраструктура як послуга, PaaS (Platform-as-a-Service) – платформа як послуга та SaaS (Software-as-a-Service) – програмне забезпечення як послуга.

Приватна хмара. Приватна хмара створюється тільки для потреб однієї організації і використовується тільки нею. Інфраструктуру приватної хмари можна побудувати на базі локальних ресурсів підприємства чи орендувати у спеціалізованих постачальників хмарних послуг (або їх комбінації).

Віртуальна приватна хмара. Послуга Virtual Private Cloud (VPC) з'явились не так давно. Проте це послуга публічної хмари. Вона дозволяє розгорнути програмно-ізольовану мережеву інфраструктуру на загальнодоступних обчислювальних ресурсах провайдера (наприклад, в хмарі AWS [7]). В порівнянні з IaaS послуга VPC пропонує клієнту побудувати програмним способом мережу традиційного вигляду з віртуальними комутуючими пристроями, серверами, ПЗ та самостійно налаштувати звичні засоби контролю та безпеки даних.

Мультихмара. Хоча цей термін не є загально прийнятим, проте ця стратегія розгортання сьогодні не є рідкісною, і варта того, щоб бути окремо виділеною. Мультихмарним будемо називати підхід, при якому організація використовує не інтегровані послуги кількох публічних хмар без приватних або в доволі рідких випадках – кількох приватних хмар без публічних.

Стратегію роботи з кількома публічними хмарами підприємства можуть вибирати з різних причин. Наприклад, потреба в розміщенні даних і доступу до ресурсів у різних регіонах, забезпечення безперервності роботи бізнесу (уникнення потенційного ризику блокування постачальника, аварійне відновлення/перемикання при відмові). Також різні хмари можуть застосовуватися для різних завдань бізнесу, оскільки зазвичай один постачальник не може бути універсальним рішенням для всіх потреб.

Гібридна хмара. Ця стратегія розгортання передбачає комбінацію з двох або більше різних хмарних інфраструктур (приватних, публічних). На відміну від моделі з кількома публічними хма-

рами, які використовуються паралельно, гібридна модель пропонує інтегровану мережу, що включає приватну, публічну хмару та локальну інфраструктуру в різних комбінаціях. При цьому створюється сегментована, але єдина загальна мережева інфраструктура. В гібридній інфраструктурі забезпечується можливість спільного розміщення, управління та надання послуг, а також уніфікований моніторинг та управління. Як наслідок, зберігання даних та запуск програм може відбуватись прозоро в різних середовищах, наприклад, приватні хмарні програми можуть звертатися до ресурсів публічної хмари під час тимчасових сплесків трафіку.

Постановка завдання. Метою статті є порівнянню можливостей, переваг та обмежень різних хмарних підходів до побудови сучасної корпоративної інфраструктури, аналіз проблем впровадження цих підходів та шляхів їх подолання.

Виклад основного матеріалу. До переваг класичних публічних хмарних сервісів належать:

– Масштабування за потребами.

– Оплата в міру використання ресурсів та відсутність потреби у підтримці власної інфраструктури.

– Широкий спектр послуг.

– Постійний доступ до інновацій та оновлень.

– Висока доступність та надійність.

Публічні сервіси в компаніях застосовують у різних сценаріях, але найпопулярнішими серед них є вирішення завдань аналітики, розширення інфраструктурних можливостей, а також завдання штучного інтелекту та машинного навчання. Коли для компанії важливими є простота використання, швидкість розгортання сервісів без витрат на підтримку власної платформи і оплата в міру використання ресурсів, модель публічної хмари є кращою. Поширений приклад – середовища тестування чи розробки.

Однак досвід тривалого використання публічних хмар виявив ряд їх недоліків:

– Обмеженість безпеки та контролю.

– Складність з дотриманням нормативних вимог та стандартів безпеки та конфіденційності.

– Залежність від Інтернету.

– Обмеженість налаштувань.

– Залежність від провайдера.

– Неконтрольовані зростання витрат.

В першу чергу з цими проблемами зіткнулись державні органи, фінансові установи та іншими організації з важливими для бізнесу операціями, які потребували вищого рівня контролю над своїм середовищем.

А побудова приватних хмар власними силами організацій зіткнулася з проблемами обмежень наявної інфраструктури, нестачею кваліфікованих кадрів для операційної підтримки та зростанням витрат на обслуговування. Локальна хмара вимагає великих початкових інвестицій та поточних витрат, необхідності забезпечувати її безпеку, обслуговування, модернізацію, підтримку та управління ресурсами приватної хмари.

Як відповідь на ці виклики з'явились послуги від хмарних провайдерів по побудові приватних і гібридних хмар для клієнтів, які пропонують сьогодні як хмарні гіганти AWS, Microsoft Azure, Google Cloud Platform та інші, так і численні регіональні та локальні постачальники хмарних послуг. Наприклад, в Україні послуги приватної хмари пропонують компанії: Denovo, onecloudplanet, Gigacloud, Colobridge, Ucloud [8–12].

Але будь-які переваги приватної хмарної інфраструктури залежать від її реалізації та мають багато відмінностей, які варто розглянути детальніше.

Послуги приватних хмар

Регіональні та локальні постачальники хмарних послуг зазвичай пропонують варіанти рішень, реалізованих в їх публічних хмарах, але адаптовані під вимоги клієнта та налаштовані на відокремлених фізичних ресурсах (власних або клієнта). Це можуть бути, моделі хмарних служб типу IaaS та PaaS (наприклад, KaaS, Kubernetes-as-a-Service). Але на відміну від публічної хмари IaaS/PaaS у приватній хмарі обчислювальні ресурси не розподіляються між замовниками, а виділяються для єдиного замовника, утворюючи і фізично і програмно ізольоване середовище.

При створенні приватної хмари можуть варіюватись моделі розподілу обов'язків з її обслуговування, які розрізняються вартістю, зручністю, ступенем відповідальності та контролю, що беруть на себе постачальник і організація. Якщо клієнт орендує всі компоненти інфраструктури (сервери, порти необхідного типу та ємності, IP-адреси, сховища даних та ліцензії), то в зону відповідальності провайдера входить забезпечення працездатності цих компонентів, їх заміна в терміни, обумовлені в SLA, закупівля та розширення ресурсів на вимогу замовника. За обслуговування компонентів власної інфраструктури замовник відповідає самостійно.

Обов'язки з управління та обслуговування програмними компонентами хмари можуть також розподілятись між сторонами від повної відповідальності замовника за управління системою віртуалізації та її компонентами (налаштування,

оновлення та моніторинг всіх хмарних служб, керування віртуальними машинами, контроль виділення ресурсів та адмініструванням операційних систем) до мінімальної, коли замовник керує лише операційними системами віртуальних машин.

Причини і умови для застосування компаніями приватних хмар.

Безпека даних. Завдяки більшому контролю та високому рівню безпеки, приватні хмарні сервіси допомагають знизити ризики, пов'язані з компрометацією даних, включаючи їх розкриття та витік, атаками та іншими подіями, які можуть вплинути на бізнес.

Наприклад, відповідно до щорічного звіту Identity Theft Resource Center (ITRC) про витік даних за 2023 рік кількість випадків компрометації даних у США збільшилася на 78% (3205) порівняно з 2022 роком (1801) та на 72% за попередній рекордний максимум у 2021 році (1860) [13].

Приватні хмари часто вибирають організації, яким необхідно забезпечити відповідність своїх методів хмарних обчислень законам про конфіденційність даних та галузевим стандартам, нормативним корпоративним вимогам або вимогам до збереження даних в певній географії. До них відносяться урядові, військові, фінансові установи та інші організації, які мають чутливі для бізнесу дані.

Вибір площадки для розгортання хмари (власна чи провайдера) залежить від конкретних вимог організації. Приватні хмарні послуги надаються в ізольованому середовищі, до якого мають доступ лише уповноважені користувачі. Проте критично важливі для бізнесу операції вимагають посиленого контролю над середовищем на власній інфраструктурі, оскільки до інфраструктури в дата центрі (ЦОД) провайдера в принципі можуть отримати несанкціонований доступ його співробітники. Для додаткового захисту локальних даних корпоративний IT-відділ може налаштовувати інструменти керування ідентифікацією та доступом (IAM) та захисту периметру безпеки для додаткового захисту локальних даних.

Рівень безпеки даних користувачів в дата центрах провайдерів розрізняється і залежать від конкретного постачальника послуг. Хоча сертифіковані провайдери можуть забезпечити високі стандарти безпеки, організація все одно несе відповідальність за контроль доступу до ресурсів, хмарну безпеку та шифрування даних (всі конфіденційні дані в публічній хмарі повинні шифруватися), а також за надійність зберігання даних.

Наприклад, в травні 2024 року крупний інцидент стався на платформі Google Cloud, в результаті якого зникли дані більш ніж півмільйона користувачів приватного пенсійного фонду. Через неправильне налаштування провайдера хмарний обліковий запис захищеної приватної хмари, розміщеної відразу на двох майданчиках, було видалено. Ситуацію частково врятував бекап в іншого провайдера [14].

Контроль. Організації мають повний контроль над своїми даними, додатками та інфраструктурою для адміністрування на апаратному рівні та на рівні гіпервізора. Це дозволяє оперативно виявляти на реагувати на проблеми у додатках, використовувати аналітику для прогнозування простоїв та вибирати найкращі політики для контролю доступу.

Гнучкість налаштування і задоволення специфічних вимог. Публічні дата центри обмежують можливості вибору типів віртуальних обчислювальних вузлів та не дозволяють їх ручного налаштування.

Тоді як певні додатки можуть мати специфічні вимогами до ресурсів, наприклад, певна частота процесора чи кількість ядер на одну віртуальну машину, модель графічного процесору чи вимоги до системи зберігання даних. Деякі компанії орієнтуються на обладнання конкретного вендора за вимогами якості, надійності та рівня гарантійного обслуговування.

Організація може очікувати певної продуктивності роботи серверів чи системи зберігання даних, наприклад, для додатків із високим постійним навантаженням. Приватна хмара на відміну від публічної може забезпечити на виділених ресурсах ізоляцію від впливу інших користувачів.

Якщо потрібна максимальна швидкодія додатку, то зберігання змінних його стану в пам'яті або на диску виділеного сервера з традиційним налаштуванням буде набагато ефективніше, ніж побудова додатку в публічній хмарі із залученням BaaS сервісів баз даних.

Приватна хмара дає змогу реалізувати проекти з обладнанням будь-якої конфігурації від будь-якого виробника, а контроль над інфраструктурою на апаратному рівні та на рівні гіпервізора дозволяє точно налаштовувати ресурси та керувати ними відповідно до конкретних вимог і задач компанії.

Але, якщо певні види робіт організації з додатками вимагають мінімально можливої затримки та відсутності залежності від Інтернет, то скоротити час звернення до IT-ресурсів до абсолютного мінімуму можна, зберігаючи їх в локальному центрі обробки даних. Також при побудові систем

Інтернету речей стратегія прикордонних обчислень є домінуючим підходом, який дозволяє підвищити автономність системи, час її відгуку та знизити накладні витрати на взаємодію з хмарним сервером.

Незалежність від провайдера. Публічні хмарні сервіс-провайдери зазвичай пропонують зручні власні рішення, які спрощують використання, управління та обслуговування певних технологій, оскільки весь технологічний стек інтегрований та сумісний між собою. Це дозволяє користувачам економити час і ресурси на навчання та підтримку різних технологій.

Проте, залежність від одного постачальника послуг публічної чи приватної хмари може обмежити гнучкість і призвести до більш високих витрат у довгостроковій перспективі. Не виключено, що сам постачальник може зіткнутися з проблемами у своїй діяльності. Він може підвищувати ціни або змінювати умови контракту. Його пропозиції можуть перестати відповідати потребам компанії, обмежити її у виборі нових технологій та інновацій, нових пропозицій ринку. Відсутність можливості легко перейти до іншого постачальника без високих витрат, юридичних обмежень чи технічної несумісності може створити серйозні ризики для бізнесу.

Власна приватна хмара на локальних ресурсах повністю позбавляє залежності від сервіс-провайдерів. Однак, її недоліками є висока вартість та складність обслуговування і обмежена гнучкість. Проте, запобігти прив'язки до одного постачальника можна і при використанні послуг публічних та приватних хмар провайдерів. Умовами для цього є побудова продуктів компанії на основі відкритих стандартів. Це дозволить легко переключатися між різними постачальниками, використовувати відкриті API та інтегруватися з іншими системами. А для приватної IaaS/PaaS хмари варто обирати або відкриті хмарні стеки (наприклад, OpenStack та Kubernetes), або ті комерційні стеки, що поширені серед різних провайдерів (наприклад, стек VMware, або продукти на базі MS Hyper-V).

Економія витрат. На початковому етапі використання перевагами публічних хмарних є економія коштів на власній інфраструктурі та обслуговуючому персоналі. Однак, із збільшенням використання витрати на хмарні послуги поступово зростають, і більшості організацій, особливо великих, важко утримати ці витрати під контролем.

Приватні хмари вимагають більше вкладень на початкових етапах, але з часом можуть бути вигіднішими, ніж публічні хмари з оплатою в міру використання. Розвивати приватну хмару вигідніше, якщо бізнес-процеси компанії створюють відносно рівномірне постійне навантаження ресурсів.

Варто також зазначити, що використання публічних хмар не відміняє повністю операційних дій з боку компанії, хоча і дозволяє зменшити розмір і кваліфікаційні вимоги до IT-команди. Між тим, високі витрати приватної хмари на IT-команду також можна зменшити, делегуючи частину рутинних робіт по налаштуванню та обслуговуванню постачальнику цієї послуги.

Приватна хмара може зменшити витрати на переміщення даних, а популярні сьогодні моделі штучного інтелекту в ній можуть бути меншими і швидшими залежно від варіанту використання, отже споживати менше ресурсів.

За даними опитувань найбільшої економії та ефективності витрат для приватних хмар організації досягають за допомогою автоматизації, інструментів планування потужності, гнучких ліцензійних механізмів, регулярної перевірки контрактів з постачальниками на відповідність актуальним потребам та інструментів управління витратами та бюджетом. В добре спланованих під задачі організації і робочі навантаження (додатки, служби та ресурси), автоматизованих та інструментованих мережах можна досягти ефективного використання коштів.

Таким чином, перевагами приватних хмар є:

– Можливість забезпечити рівень безпеку даних, що відповідає будь-яким нормам, законам і стандартам.

– Повний контроль над даними, додатками та інфраструктурою.

– Можливість вибору специфічного обладнання та гнучкість налаштувань відповідно до конкретних вимог бізнес-завдань.

– Можливість забезпечити високу продуктивність додатків.

– Можливість забезпечити високий рівень SLA клієнтів – доступність, продуктивність, масштабованість додатків при високому постійному навантаженні за рахунок виділених ресурсів.

– Можливість уникнути прив'язки до постачальника за рахунок вибору відкритих стандартів та стандартних стеків технологій.

В порівнянні з публічною хмарою приватна хмара налаштовується для задоволення унікальних потреб бізнесу та безпеки організації. Вона надає більше контролю над інфраструктурою, програмами та даними, і дозволяє управляти робочими навантаженнями відповідно до вимог організації, без втрати безпеки та продуктивності, що раніше досягалося лише спеціальними локальними ЦОД. Тому, якщо організація має критичні

для бізнесу системи, для яких важливо врахування індивідуальних вимог, зниження ризиків, безпека, а також організація має фінансові ресурси на розвиток інфраструктури у міру потреби, то вибір на користь приватної хмари буде кращим варіантом.

До недоліків приватної хмари можна віднести:

– Високі початкові фінансові витрати на обладнання та програмне забезпечення, а в подальшому витрати на навчання та утримання персоналу для підтримки хмари власними силами.

– Масштабованість обмежується виділеними обчислювальними ресурсами, а додавання ресурсів для задоволення непередбачуваних вимог потребує певного часу і зусиль.

– Обмеження доступу до нових технологій та інновацій, які надають постачальники публічних хмарних послуг.

Послуги гібридних хмар

На подолання проблем, пов'язаних з приватними хмарами спрямована стратегія гібридних хмар. Інтегруючи загальнодоступні, приватні та локальні ресурси, компанії можуть отримати більше гнучкості та оптимізувати ресурси і витрати.

Переваги гібридної хмари:

– Доступ до інновацій. Організації можуть отримати гнучкість та інновації загальнодоступних хмар та задовольнити потреби різних бізнес-завдань в залежності від унікальних пропозицій постачальників.

– Керування ризиками. Організації можуть розподілити ризики, розподіляючи ресурси або резервні копії між різними хмарами, в тому числі, між хмарами різних постачальників.

– Розподіл контролю. Організації можуть перемістити некритичні додатки в загальнодоступну хмару, а конфіденційні дані та додатки в залежності від галузевих вимог або залишити на власних локальних ресурсах або на ресурсах приватної інфраструктури.

– Гнучкість масштабування. Організації можуть використовувати додаткові ресурси на вимогу в загальнодоступній хмарі під час короткострокових сплесків навантаження, а ресурси приватної хмари – для стабільних робочих навантажень, щоб не витрачати кошти на оплату надлишкових виділених ресурсів під час їх простою.

– Ефективне використання апаратних ресурсів. Для бізнес-завдань, що потребують високопродуктивних обчислень, в залежності від частоти та тривалості їх виконання організації можуть користуватися послугами або приватних або публічних хмар провайдерів, а робочі навантаження, для яких потрібна низька затримка, виконувати на власних локальних ресурсах.

– Економічність. Інтеграція різних типів хмар дозволяє оптимізувати витрати, вибираючи найбільш економічно ефективну платформу для кожного робочого навантаження.

Популярність гібридного підходу полягає в можливості поєднати в загальній інфраструктурі зручність та масштабованість публічних хмар з додатковим контролем, безпекою даних та оптимізацією швидкодії, які можуть надати приватні хмари та власна інфраструктура. Такий підхід дозволяє швидко реагувати на мінливі потреби бізнесу, оптимізувати витрати та ресурси, ефективно розподіляючи їх там, де це є найбільш доцільним.

Однак, впровадження гібридних хмарних сервісів пов'язано з рядом проблем.

– Складність наскрізного управління. Типові операційні завдання такі, як управління ресурсами та додатками, моніторинг, ведення журналу та усунення несправностей, безпека та технічна підтримка. у гібридному середовищі стає більш складним через різноманітність систем та інструментів. Може знадобитися залучення різних спеціалістів – для управління публічними та приватними хмарними ресурсами.

– Комплексність безпеки. Передача даних між публічною та приватною частинами потребує надійних та безпечних мережевих з'єднань. Складнощі у забезпеченні єдиних стандартів безпеки для обох середовищ можуть становити ризик безпеки.

– Підтримка стабільного рівня обслуговування SLA. Відмінності в архітектурі конфігурації між публічною та приватною частинами а також різні стратегії забезпечення продуктивності можуть створювати ризики сумісності та впливати на ефективність роботи систем.

– Управління витратами. Необхідність реалізації стратегій з оптимізації витрат на підставі аналізу за політик окремих провайдерів.

– Штат кваліфікованих фахівців для операційної підтримки хмари. Організації необхідно утримувати та дбати про підвищення кваліфікації персоналу з обслуговування та регулярного оновлення гібридної хмарної інфраструктури. Причому, потрібні окремі експерти по кожному напрямку технологій: для приватної, локальної та кожної з публічних хмар (наприклад, зі знанням нюансів в організації VMware, MS Azure або AWS).

– Прив'язка до постачальника. Така прив'язка виникає при використанні специфічних сервісів або технологій, які тісно інтегровані з конкретним постачальником хмарних послуг.

Між тим, добре розуміючі потреби і проблеми компаній, світові постачальники, розробники

хмарних рішень та регіональні сервіс-провайдери прагнуть забезпечити сумісність своїх платформ для надання послуг гібридних хмар.

Прикладами гібридних хмарних платформ для власних стеків технологій можуть слугувати AWS Outposts, VMware Cloud on AWS [15], Azure Stack, Azure Arc, Azure VMware Solution [16], Google Anthos [17], VMware Cloud Foundation [18]. А у травні 2023 року IBM представила IBM Hybrid Cloud Mesh – універсальну SaaS-пропозицію, покликану допомогти підприємствам керувати своєю інфраструктурою в гібридних, багатохмарних та гетерогенних середовищах [19]. Як приклади пропозицій для управління гібридною інфраструктурою в Україні можна привести: Hybrid Cloud Management X (HCMX) від компанії Micro Focus [20], рішення від Sim-networks, Colobridge, Ucloud [21, 11, 12].

Спростити інтеграцію також може підхід, при якому компанії прагнуть до уніфікації платформ у межах власної IT-інфраструктури для приватної та публічної хмари. При виборі стеку для побудови приватної хмара, наприклад, VMware, організація буде орієнтуватись на провайдерів сервісів IaaS/PaaS, які також використовують цю платформу.

Досвідчені сервіс провайдери з міцними позиціями на ринку хмарних послуг завжди мають в своєму штаті кваліфікованих фахівців. Вони надають допомогу організаціям у виборі архітектурних рішень для гібридного чи мультихмарного середовища, в тому числі із залученням сторонніх сервісів, в розрахунку витрат та економічного ефекту від впровадження, в налаштуванні комплексної безпеки та ефективної роботи додатків, а також в інших питаннях побудови, підтримки та розвитку хмарної інфраструктури компанії. Це особливо актуально для малого та середнього бізнесу, у якого бракує власних досвідчених спеціалістів.

Хмарна стратегія

Подолання проблем при побудові гібридної, приватної чи мультихмари вимагає від організації продуманої стратегії, гарного архітектурного рішення, залучення відповідних технологій та досвідчених партнерів.

Спочатку компанія має оцінити існуюче програмне забезпечення, визначити свої завдання та цілі, рівень ризику, який вона готова прийняти щодо своєї IT-інфраструктури та даних.

Для ефективного використання всіх переваг гібридного або мультихмарного підходу та успішного керування складною інфраструктурою, організація має розробити стратегію хмари. Стратегія повинна визначати, які програми та дані будуть розміщуватися локально, а які – у хмарі, які додаткові сервіси на стороні провайдера необхідні компанії.

Хороша хмарна стратегія повинна містити чітке економічне обґрунтування, оцінку витрат та зусиль, пов'язаних з її реалізацією, оцінку економічних, організаційних та технічних переваг, які отримає компанія від використання хмари. Плануючи міграцію у хмару, важливо розробити план поетапного та своєчасного виведення з експлуатації застарілого обладнання, обслуговування якого постійно вимагає коштів.

На наступному етапі слід розглянути різні хмарні стеки. Якщо завдання не надто критичні, можна обирати open source платформи, для важливих бізнес-додатків та середовищ краще використовувати комерційні платформи.

Стратегія застосування відкритих або широко підтримуваних комерційних платформ в основі хмари та програмних продуктів компанії, постійний аналіз нових пропозицій ринку та стану технологій дозволить уникати прив'язки до одного постачальника послуг та адаптувати корпоративну інфраструктуру до мінливих потреб бізнесу.

Подальшим кроком буде вибір базового хмарного провайдера, що міг би забезпечити максимальні переваги щодо набору сервісів, вартості, продуктивності та безпеки. Слід звертати увагу на клас хмарної платформи, яку пропонує провайдер, наприклад, корпоративний – Hyper-V або операторський – VMware vCloud, MS Azure Stack. Причому, рішення на Hyper-V більш орієнтовані на використання у власній корпоративній мережі та підтримку успадкованих додатків ніж на побудову нових на основі мікросервісної архітектури та концепції DevOps.

Також має значення наявність сертифікатів та статусів, які підтверджують компетенції провайдера, наявність технічної підтримки від вендорів.

Доцільно вибрати поетапний підхід до переходу на модель гібридної хмари та почати з менш складних робочих навантажень, перш ніж переходити до більш важливих систем, поступово переносячи робочі навантаження одну за одною.

Висновки. В сучасному конкурентному світі, де компанії прагнуть до цифрової трансформації, щоб отримати максимум ринкових переваг, хмарні технології стають невід'ємною частиною успішного бізнесу. Наряду з широким використанням загальнодоступних хмарних сервісів компанії все більше впроваджують приватні, гібридні та мультихмарні рішення, щоб досягти балансу між гнучкістю, контролем та інноваціями. Комбінування різних хмарних платформ, розподіл даних та навантаження між ними дозволяє оптимізувати витрати, зменшити ризики, пов'язані з виходом з ладу або змінами політики одного постачальника послуг, забезпечити відповідність галузевим

стандартам конфіденційності та безпеки, підвищити надійності та гнучкості в управлінні своєю IT-інфраструктурою.

А добре усвідомлення переваг та обмежень різних підходів до розгортання хмарних послуг, розробка продуманої стратегії та архітектурного рішення, залучення досвідчених партнерів дозволять організаціям уникнути поширених помилок і забезпечити максимальну ефективність від використання корпоративної хмари.

Список літератури:

1. Закон України “Про хмарні послуги”, https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2075-20#Text
2. Flexera: State of the Cloud Report. https://info.flexera.com/CM-REPORT-State-of-the-Cloud 2024
3. CNCF 2023 Annual Survey. April 2024. https://www.cncf.io/reports/cncf-annual-survey-2023/
4. Mordor Intelligence. Cloud Computing Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts (2024-2029) https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/cloud-computing-market
5. Mordor Intelligence. Hybrid Cloud Market Size - Industry Report on Share, Growth Trends & Forecasts Analysis (2024 - 2029). https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/hybrid-cloud-market
6. Mell, Peter and Grance, Timothy. The NIST Definition of Cloud Computing. Recommendations of the National Institute of Standards and Technology. NIST (20 жовтня 2011). https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-145.pdf
7. AWS. What is a Private Cloud? https://aws.amazon.com/what-is/private-cloud/
8. De Novo, https://denovo.ua/
9. OneCloudPlanet, https://onecloudplanet.com
10. Gigacloud, https://gigacloud.ua/
11. COLOBRIDGE, https://blog.colobridge.net/2024/02/multicloud-and-hybrid-cloud-solutions-by-azure/
12. Ucloud. Хмарні послуги, https://ucloud.ua/services/
13. ITRC Annual Data Breach Report https://www.idtheftcenter.org/publication/2023-data-breach-report/
14.The Guardian. Google Cloud accidentally deletes UniSuper’s online account due to ‘unprecedented misconfiguration’. https://www.theguardian.com/australia-news/article/2024/may/09/unisuper-google-cloud-issue-account-access
15. AWS, https://aws.amazon.com/hybrid-multicloud/
16. Microsoft, https://azure.microsoft.com/ solutions/hybrid-cloud-app
17. Google Cloud, Anthos, https://cloud.google.com/anthos
18.VMware,IntroducingVMwareCloudFoundation9,https://blogs.vmware.com/cloud-foundation/2024/08/27/vmware-cloud-foundation-9/
19. IBM, IBM Hybrid Cloud Mesh, https://www.ibm.com/products/hybrid-cloud-mesh
20. Elko, https://www.elko.ua/produkty/hybrid-cloud-management-x
21. Gibrid Cloud Solutions, https://www.sim-networks.com/en/cloud/hybrid-cloud

Hiorhizova-Hai V.S., Kyriusha B.A. CLOUD SERVICES IN CORPORATE INFRASTRUCTURE

The article analyzes marketing reports of world-famous organizations and companies on the state of cloud technologies implementation, analyzes the proposals of global and regional service providers offering services in Ukraine. Based on this analysis, the article compares the capabilities, advantages and limitations of various cloud approaches to building a modern corporate infrastructure of organizations, considers the problems of implementing private, hybrid and multi-cloud technologies and ways to overcome them.

Modern companies are expanding their use of cloud technologies to gain competitive advantages in the market. Long-term experience with public clouds has revealed a number of their disadvantages: limited security and control, difficulty in complying with regulatory requirements, high latency, limited customization, service provider dependency, and uncontrolled cost growth. When organizations build clouds by our own efforts on-premises, they faced a shortage of qualified personnel to support them, problems with the limitations of existing infrastructure, and rising maintenance costs. In response to these challenges, global and regional service providers have offered services to deploy private clouds in an isolated environment on customers' leased or local infrastructure and hybrid cloud services that combine the benefits of private and public clouds to balance agility, control and innovation. According to various surveys, the vast majority of companies in the world choose a hybrid approach to deploying a corporate cloud.These cloud strategies are changing approaches to building corporate infrastructure and are becoming more popular year by year. But the implementation of these approaches, along with the benefits, can also lead to many problems for companies. However, challenges can be overcome if an organization has a good understanding of the different cloud approaches, a sound strategy and architecture for cloud deployment, and experienced partners.

This article aims to help organizations that are looking for new solutions for their business success to make the right choice.

Key words: *cloud technologies, corporate infrastructure, data security, public cloud, private cloud, hybrid cloud.*

УДК 004.42
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/06

Голубєв Л.П.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ківа І.Л.
Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПОБУТОВИМИ ПРИСТРОЯМИ НА БАЗІ HOME ASSISTANT

У статті розглянуто створення системи моніторингу споживання електроенергії побутовими пристроями. Проведено аналіз існуючих мікропроцесорних систем управління розумним будинком. Запропонований авторами підхід дозволяє здійснювати моніторинг електроенергії, що ґрунтується на можливості вимірювання споживання електроенергії кожним побутовим приладом окремо. Таким чином, можна гнучко і динамічно змінювати конфігурацію споживачів електроенергії.

Розроблено структуру системи, засновану на використанні мікрокомп'ютера Orange PI Zero 3, який забезпечує достатню продуктивність та має невелику ціну. Для моніторингу та управління споживання електроенергії побутовими споживачами авторами використана система Home Assistant (HA), яка призначена для домашньої автоматизації та підтримує пристрої різних виробників, забезпечує створення складних сценаріїв моніторингу та автоматизації процесів. Ця система з відкритим програмним кодом працює як через web-інтерфейс, так і в додатку для мобільних пристроїв.

У процесі розробки системи виконано інсталяцію пакета Home Assistant Superviser, необхідного для встановлення програмного забезпечення. Розроблено конфігурацію Wi-Fi розетки та виконано її підключення до системи HomeAssistant.

Підключення кінцевих споживачів виконувалося за допомогою обладнання фірми eWeLink, завдяки чому можна не лише моніторити споживання електроенергії, але й, при необхідності, віддалено керувати підключенням споживачів.

Інформація про споживання електроенергії динамічно відображається на екрані користувача та автоматично записується у БД. Таким чином, користувач має можливість надалі аналізувати споживання електроенергії кожним споживачем. Крім цього, в період блекауту є можливість віддалено отримати інформацію про наявність електроенергії у приміщенні у будь-який момент часу.

Ключові слова: *споживання електроенергії, моніторинг, Home Assistant, мікрокомп'ютер, Orange PI Zero 3, Wi-Fi-розетка, автоматизація споживання електроенергії.*

Постановка проблеми. У період російської агресії та постійних варварських ракетних атак на енергетичну інфраструктуру України особливо актуальним є питання моніторингу та управління споживання електроенергії побутовими пристроями споживання.

Дуже важливо моніторити споживання електроенергії окремим побутовим приладом, зберігати отримані дані БД для подальшого аналізу та прийняття рішень.

Особливо важливо моніторити споживання електроенергії під час живлення побутових приладів від акумуляторних джерел живлення (таких як EcoFlow, Bluetti та ін.), т.к. від цього залежить час роботи зарядної станції до чергової підзарядки. Необхідно також, щоб будь-який користувач міг оперативно моніторити споживання електричної енергії побутовими приладами і мати можливість дистанційно керувати підключенням.

Тому розробка автоматизованої системи моніторингу та управління споживання електроенергії побутовими приладами є на сьогоднішній день особливо актуальною.

Більшість існуючих систем орієнтується на інформацію, одержувану з квартирного лічильника електроенергії. Цей підхід дає сумарну картину споживання електроенергії всієї квартири (вдома), але далеко не всі лічильники обладнані відповідним інтерфейсом.

Автори запропонували новий метод моніторингу споживання електричної енергії, що базується на використанні програмної системи Home Assistant.

Home Assistant – це одна з найпопулярніших програмних платформ проектування, автоматизації та керування пристроями розумного будинку та інтернету речей різних брендів. Система реалізована мовою програмування Python та має відкритий вихідний код.

За допомогою Home Assistant можна, наприклад, встановити сповіщення про завершення роботи посудомийної машини, налаштувати автоматизацію для освітлення/опалення, увімкнення/вимкнення вентилятора залежно від температури та вологості або щось складніше. Список інших популярних кейсів можна знайти у спеціальному розділі Examples на сайті програми.

Одна з головних переваг системи – її доступність. Вона працює на пристроях під управлінням усіх сучасних ОС. Виконати інсталяцію Home Assistant можна на Windows, MacOS, Linux або навіть на Raspberry Pi. Завдяки мобільному додатку установка можлива не тільки на стаціонарні комп'ютери та ноутбуки, а й на смартфони та планшети на Android та iOS.

Доцільно щоб система, що розробляється, була органічно включена в загальну систему управління будинком.

Створення автоматизованої системи моніторингу споживання електричної енергії побутовими пристроями на основі HomeAssistant дозволить користувачеві відстежувати в реальному часі споживання електроенергії та керувати підключеними пристроями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження в галузі розробки систем моніторингу та керування споживанням електроенергії показують значний прогрес у використанні технологій IoT, мікроконтролерів та сучасних методів аналізу даних.

Ці дослідження вказують на важливість інтеграції високоточних сенсорів, використання машинного навчання для аналізу даних, та впровадження енергозберігаючих технологій для покращення функціональності та надійності вимірювальних комплексів.

У роботах [7–9] розглядаються питання, пов'язані з побудовою та експлуатацією систем розумного будинку. Детально розглядається налаштування елементів для розумного будинку – установка пристроїв, а також їх прив'язка до додатків та цифрових помічників для управління ними. Розглядаються конкретні області розумних домашніх пристроїв, включаючи встановлення та налаштування, а також способи керування ними після їх запуску та роботи. Деякі області, які докладно розглядаються, включають: розумне освітлення, розумне опалення, розумні системи безпеки, розумні домашні камери, розумні замки, розумні розетки.

Автори у роботах [1, 6] розглядають питання створення власної екосистеми для автоматизації будинку за допомогою програмного забезпечення Home Assistant. Розглянуто компоненти системи домашньої автоматизації, створення та налаштування їх для безперебійної роботи, встановлення Home Assistant на Raspberry Pi для роботи як сервер домашньої автоматизації, створення власних датчиків IoT на основі ESP32/ESP8266 та налаштування реальних сценаріїв використання автоматизації на базі практичних прикладів та проектів.

Рішення на основі Home Assistant для розумного будинку з використанням мікроконтролерів описані у роботах [2, 3]. Розглянуто такі питання: проектування та створення індивідуальних пристроїв домашньої автоматизації; підключення пристроїв Google Home та Google Voice Assistant до Raspberry Pi; навігація операційними системами домашньої автоматизації.

У роботах [4, 5] автори пропонують використовувати Raspberry PI як мікрокомп'ютер для розумного будинку на основі Home Assistant. Розглянуто питання встановлення, налаштування системи Home Assistant на Raspberry PI, а також питання підключення різних датчиків температури, вологості, тиску повітря, руху, а також відеокамери.

Однак питання моніторингу споживання електроенергії та енергозбереження розглянуті, на наш погляд, не повною мірою. Крім того, більшість рішень виконано на базі мікрокомп'ютера Raspberry PI та не розглянуто можливість використання інших мікрокомп'ютерів, хоча їх застосування є економічно доцільним.

Постановка завдання. Метою статті є розробка автоматизованої системи моніторингу споживання електричної енергії побутовими приладами. Система повинна видавати користувачу інформацію про поточний стан споживання побутовим приладом електроенергії (Wh), напругу(V) та спожитий струм(A). Також повинна бути реалізована можливість віддаленого управління підключенням побутових пристроїв.

Виклад основного матеріалу. Система моніторингу та керування споживання електроенергії побутовими приладами складається з наступних компонентів: керуючий пристрій (мікрокомп'ютер), програмна платформа (Home Assistant), блок вимірювання споживання та керу-

вання підключенням побутових пристроїв (Wifi Smart Socket WHZ01-WC).

Як керуючий пристрій системи було обрано мікрокомп'ютер OrangePI Zero 3 з такими основними параметрами:

– процесор: чотири-ядерний Allwinner H618 Cortex-A53 із тактовою частотою 1,5 ГГц;

– графічний процесор: Mali-G31 MP2 з підтримкою OpenGL ES 1.0/2.0/3.2, OpenCL 2.0, Vulkan 1.1;

– CPU: Allwinner H618 4 ядра Cortex-A53 1.5ГГц;

– GPU: Mali G31 MP2 підтримка OpenGL ES 1.0/2.0/3.2, OpenCL 2.0, Vulkan 1.1;

– Оперативна пам'ять: 1ГБ LPDDR4;

– Flash: 16МБ SPI Flash;

– WiFi + Bluetooth: підтримка WiFi5 та Bluetooth 5.0;

– Інтерфейс GPIO: 26 контактів + 13 контактів;

– Живлення: 5V3A через Type-C;

– Підтримувані OS: Android 12 TV, Debian11, Debian12, Ubuntu22.04, Ubuntu20.04;

– Розміри плати: 50 x 55 мм.

На рис. 1 представлені компоненти та інтерфейси Orange PI Zero 3:

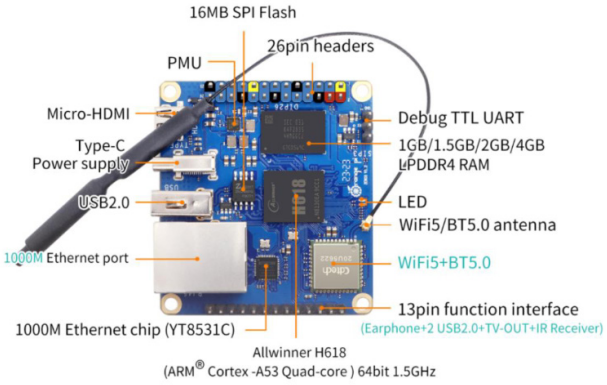


Рис. 1. Основні компоненти та інтерфейси мікрокомп'ютера OrangePI Zero 3

Вибір цього мікрокомп'ютера обумовлений його параметрами, які забезпечують встановлення та стабільну роботу Home Assistant та дуже низькою ціною (~$12).

Як програмна платформа системи була обрана Home Assistant, яка була встановлена на мікрокомп'ютер OrangePI Zero3. Це зумовлено такими властивостями системи Home Assistant:

– відкритий вихідний код;

– велика кількість пристроїв різних виробників, що підтримується Home Assistant;

– підтримка всіх стандартів (Wi-Fi, BlueTooth, ZigBee, Z-Wave та ін.);

– простота освоєння та використання;

– величезне ком'юніті, завжди готове допомогти і порадами, і готовим програмним кодом.

Home Assistant – програмна платформа для домашньої автоматизації, що забезпечує вирішення всіх супутніх питань – від додавання пристроїв до створення сценаріїв будь-якої складності та використання голосових помічників. Основна мова розробки – Python, але для вирішення більшості завдань користувачу не доведеться власноруч писати жодного рядка коду.

Однією з головних переваг Home Assistant є просте конфігурування системи. На відміну від більшості аналогічних платформ, тут не потрібно постійного звернення до командного рядка для зміни конфігурації. Конфігурація зберігається в YAML-файлах (при розгортанні під Linux – у папці ~/.homeassistant, основний конфігураційний файл – configuration.yaml). Файли конфігурації можна редагувати в будь-якому текстовому редакторі, всі зміни застосовуються після перезавантаження налаштувань у веб-інтерфейсі на вкладці Configuration – General.

Під час першого запуску платформи необхідно сформувати обліковий запис користувача та вказати геолокацію, після цього система створить конфігураційні файли, завантажить передбачені варіантом установки додаткові модулі, розгорне локальний веб-сервіс, доступний за адресом http://localhost:8123.

У браузері при переході на цю адресу користувачеві буде доступний веб-інтерфейс програми (рис. 2).

Однією з головних переваг HA проти основними конкурентами є дуже багато інтеграцій. На сторінці офіційного сайту (https://www.home-assistant.io/integrations/) сьогодні пропонується близько 2000 перевірених та схвалених спільнотою інтеграцій.

Системи та пристрої, які ви можете підключити за допомогою інтеграцій, включають Amazon Alexa, Google Nest та Google Assistant, Samsung SmartThings, ZHA (Zigbee Home Automation), Xiaomi, Dyson та багато інших (рис. 3). Тут можна знайти не тільки датчики та виконавчі механізми, але шлюзи для підключення, у тому числі для девайсів інших екосистем – Apple, Samsung, Ikea, Xiaomi. До списку включені не тільки фізичні пристрої, а й багато онлайн-сервісів. Однак не всі пристрої підключаються до Home Assistant автоматично, вибравши відповідний компонент.

Для моніторингу споживання електроенергії та керування побутовими приладами необхідно встановити установку компонента eWeLink

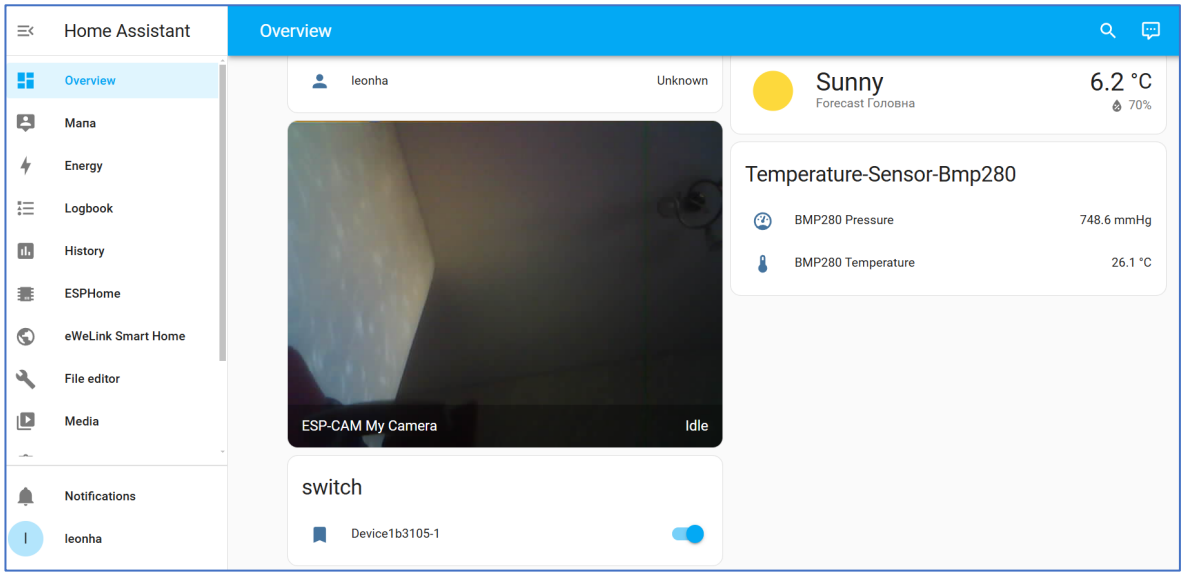


Рис. 2. WEB-інтерфейс програми Home Assistant

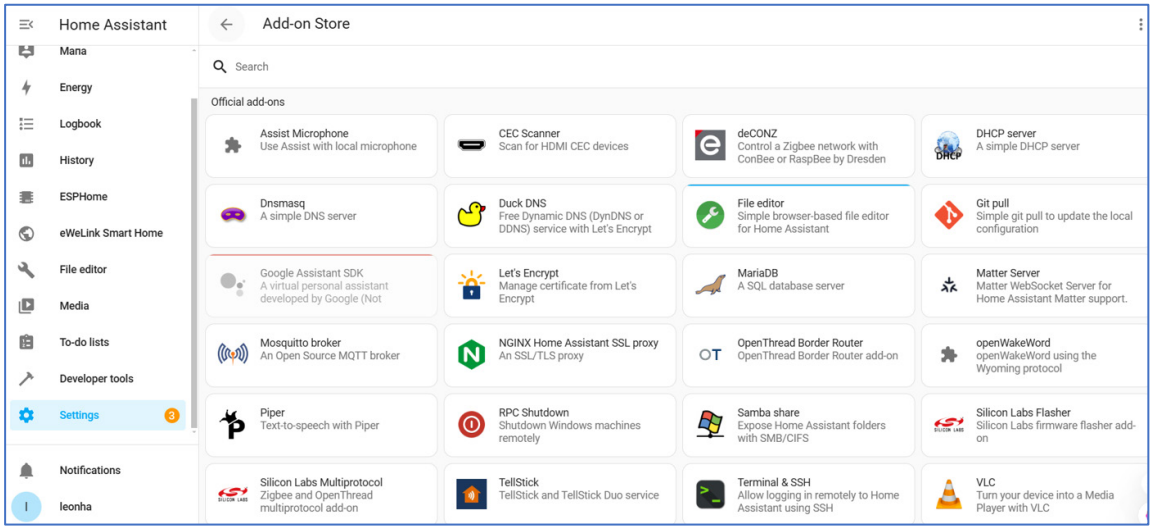


Рис. 3. Список компонентів, що підключаються

Smart Home, який підтримує пристрій Wifi Smart Socket WHZ01-WC. У стандартному переліку виробників він відсутній, тому для його встановлення необхідно звернутись за адресом: https://gothub.com/CoolKit-Technologies/ha-addon та завантажити необхідне програмне забезпечення.

Після встановлення необхідно виконати налаштування компонента, вказавши відповідні параметри (рис. 4).

У конфігураційному файлі switch_Device1b3105-1.yaml буде записана конфігураційна інформація. Після цього при переході в Web-інтерфейс цього пристрою буде відображатися поточне значення напруги, струму та електроенергії, що споживається.

Рис. 5 демонструє процес моніторингу споживання електроенергії настільним комп'ютером. Поточне значення споживання електроенергії побутовим споживачем становить 91,5 Вт. У цьому вікні за допомогою кнопки можна керувати підключенням відповідного пристрою.

Для моніторингу споживання електроенергії на вибраному побутовому пристрої в певному часовому інтервалі необхідно перейти на вкладку Stats-History

На рис. 6 наведено споживання електроенергії настільним комп'ютером за листопад місяць. З аналізу отриманої інформації слід, що максимальне добове споживання електроенергії настільним комп'ютером становить 1,2 кВт. Можна відзначити, що у вихідні споживання електроенергії

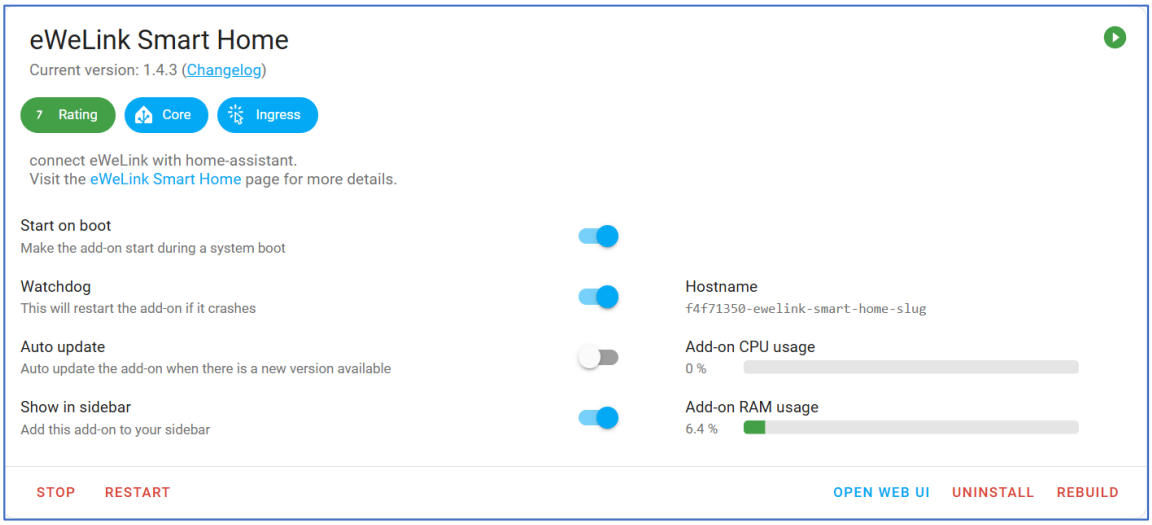


Рис. 4. Вікно встановлення та керування параметрами eWeLinkSmartHome

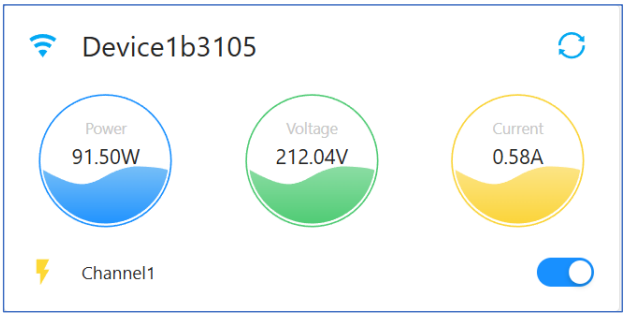


Рис. 5. Поточні показники напруги, струму та споживання електроенергії настільним комп'ютером

Рис. 6. Споживання електроенергії настільним комп'ютером протягом місяця

цим споживачем зменшується. Сумарне споживання електроенергії за місяць становить 14,1 кВт.

Висновки. У даному дослідженні розглянуто розроблену систему моніторингу споживання електроенергії за допомогою інтернет-платформи Home Assistant.

Безперечною перевагою системи є можливість оперативного спостереження споживання електроенергії побутовими споживачами, і навіть можливість віддаленого включення чи відключення побутового приладу за необхідності і в такий спосіб змінювати конфігурацію підключених пристроїв. Збереження спостережень у БД дає можливість досліджувати історію споживання електроенергії та робити відповідні висновки. Використання програмної бази системи Home Assistant дозволяє включити розроблену систему в інтегровану систему управління розумним будинком.

Список літератури:

1. M. Carvalho Building Smart Home Automation Solutions with Home Assistant: Configure, integrate, and manage hardware and software systems to automate your home. Packt Publishing, 2023. 356 p.

2. D. Norris Home Automation with Raspberry Pi: Projects Using Google Home, Amazon Echo, and Other Intelligent Personal Assistants. McGraw-Hill Education TAB, 2019. 240 p.

3. Dipankar Saha Smart Home Automation with IoT: The ultimate DIY guide for making smart homes using open-source softwares (English Edition), BPB Publications, 2024. 218 p.

4. Christoph Rothermel, Mike Riley Your Raspberry Pi Smart Home: Setting up your Smart Home with Home Assistant – Affordable and Manufacturer Independent, Independently published, 2023. 114 p.

5. Ricardo Gerardi Automate Your Home Using Go: Build a Personal Data Center with Raspberry Pi, Docker, Prometheus, and Grafana, Pragmatic Bookshelf, 2024. 162 p.

6. Christoph Rothermel Your Smart Home Upgrade: Over 100 Ideas for Automation with Home Assistant – From Light and Climate Control to Security Optimization (Your Smart Home with Home Assistant, 2024. 149 p.

7. Marlon Buchanan The Smart Home Manual: How to Automate Your Home to Keep Your Family Entertained, Comfortable, and Safe (Home Technology Manuals), HomeTechHacker, 2020. 136 p.

8. Andrew Howe The Smarthome Book: Simple ideas to assist with your smarthome renovation, Independently published, 2018. 120 p.

9. Nick Vandome Smart Homes in easy steps: Master smart technology for your home, In Easy Steps Limited; 1st edition, 2018. 192 p.

10. Wolfgang Beer Open Source Home Automation: An Introduction into Home Assistant and Open Source Home Automation, B08JJ5PYQJ, 2020. 96 p.

Golubev L.P., Kiva I.L. AN AUTOMATED SYSTEM FOR MONITORING ELECTRIC ENERGY CONSUMPTION BY DEVICES BASED ON HOME ASSISTANT

The article considers the creation of a system for monitoring electricity consumption by household appliances. An analysis of existing microprocessor-based smart home control systems is carried out. The approach proposed by the authors allows for electricity monitoring, which is based on the ability to measure electricity consumption by each household appliance separately. Thus, it is possible to flexibly and dynamically change the configuration of electricity consumers.

The system structure is developed based on the use of the Orange PI Zero 3 microcomputer, which provides sufficient performance and has a low price. To monitor and manage electricity consumption by household consumers, the authors used the Home Assistant (HA) system, which is designed for home automation and supports devices from different manufacturers, providing the creation of complex scenarios for monitoring and automating processes. This open source system works both through a web interface and in an application for mobile devices.

During the system development process, the Home Assistant Supervisor package, which is required for software installation, was installed. The Wi-Fi socket configuration was developed and its connection to the HomeAssistant system was completed.

The connection of end consumers was carried out using eWeLink equipment, which allows not only monitoring electricity consumption, but also, if necessary, remotely controlling the connection of consumers.

Information about electricity consumption is dynamically displayed on the user's screen and automatically recorded in the database. Thus, the user has the opportunity to further analyze the electricity consumption of each consumer. In addition, during the blackout period, it is possible to remotely obtain information about the availability of electricity in the room at any time.

Key words: *electricity consumption, monitoring, Home Assistant, microcomputer, Orange PI Zero 3, Wi-Fi-socket, automation of electricity consumption.*

УДК 004.056.5
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/07

Звєрєв В.П.
Державний торговельно-економічний університет

Бушков В.Г.
Державний торговельно-економічний університет

КРОС-КАНАЛЬНІ АНТИФРОД-СИСТЕМИ ЯК ІНСТРУМЕНТ КОМПЛЕКСНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОННИХ КОМУНІКАЦІЙ ЦИФРОВОЇ ЕКОНОМІКИ

У статті розглянуто проблему забезпечення безпеки електронних комунікацій у цифровій економіці, що пов'язана зі зростанням шахрайських дій у фінансовій сфері. Активне поширення кібершахрайства зумовлює необхідність розробки сучасних антифрод-систем, здатних ефективно запобігати шахрайству в режимі реального часу. Основний акцент зроблено на використанні крос-канальних антифрод-систем, що інтегрують машинне навчання, аналіз великих даних, графові моделі й аналіз часових рядів для досягнення максимальної ефективності.

Аналіз у статті включає сучасні підходи до виявлення шахрайства, серед яких методи кластеризації (k-means, DBSCAN), алгоритми прогнозування (ARIMA, LSTM), а також графові моделі (PageRank) для аналізу структурованих даних. Особливу увагу приділено інтеграції багатоканальних даних, які надходять із мобільних додатків, веб-платформ і фізичних точок продажу. Такий підхід дозволяє створювати єдиний профіль користувача, що забезпечує більш точне виявлення аномалій. Увага також акцентується на оптимізації алгоритмів, зменшенні кількості хибнопозитивних результатів і підвищенні масштабованості систем, що є важливими критеріями їх ефективності.

Запропоновано концепцію крос-канальної антифрод-системи, яка використовує дані з різних джерел, інтегруючи їх у єдиний аналітичний простір. Система реалізує функції аналізу зв'язків між транзакціями, що дозволяє виявляти приховані закономірності, поведінкові аномалії та прогнозувати потенційні ризики. Для цього використовується аналіз часових рядів, що дає змогу враховувати поведінкові патерни й оцінювати зміни в динаміці транзакцій.

Результати дослідження показують, що такі системи значно знижують фінансові втрати від шахрайства, підвищують точність ідентифікації підозрілих операцій і мінімізують кількість помилкових блокувань. Крім того, система демонструє гнучкість і здатність адаптуватися до різних обсягів даних і нових загроз, що виникають у цифровому середовищі.

Дослідження є важливим внеском у вирішення проблеми протидії шахрайству в умовах цифрової економіки. Воно корисне для фінансових установ, розробників програмного забезпечення, спеціалістів із кібербезпеки, а також науковців, які працюють у цій сфері.

Ключові слова: *антифрод-система, крос-канальна безпека, цифрова економіка, машинне навчання, біометрична автентифікація, цифрові загрози.*

Постановка проблеми. У сучасному світі цифрова економіка стала невід'ємною частиною повсякденного життя, забезпечуючи зручність та ефективність здійснення фінансових операцій. Проте, разом із розвитком цифрових технологій, зростає і рівень ризиків, пов'язаних із шахрайством у фінансовій сфері. Глобальні збитки від кібершахрайства досягли рекордних масштабів – лише за період із 2019 до 2022 року вони зросли з 1,2 трлн до 7,1 трлн доларів США [1, с. 34–35]. До 2026 року прогнозується, що ці втрати перевищать 20 трлн доларів, що робить проблему безпеки у фінансовому секторі пріоритетною для багатьох установ [1, с. 36].

Україна також не є винятком. За останні роки кількість шахрайських операцій, зокрема із застосуванням соціальної інженерії, збільшилася на 26% порівняно з попередніми періодами [2, с. 56]. Це підкреслює вразливість фінансових установ до сучасних загроз і вимагає швидкого впровадження ефективних рішень для протидії шахрайству.

Рисунок 1 переконливо демонструє зростання глобальних втрат від шахрайства з 2019 по 2022 роки та прогноз на 2026 рік. На графіку чітко видно експоненціальне збільшення втрат, що потребує проактивних дій з боку всіх гравців на фінансовому ринку.

Рис. 1.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукова література підтверджує, що використання сучасних технологій, таких як машинне навчання, аналіз великих даних та графові моделі, дозволяє суттєво покращити ефективність антифрод-систем. Наприклад, компанія PayPal інтегрувала алгоритми машинного навчання для аналізу мільйонів транзакцій у реальному часі. Це дало змогу значно скоротити рівень шахрайства та забезпечити проактивний захист платформи [3, с. 78–79]. Mastercard впровадила систему Decision Intelligence, яка використовує штучний інтелект для моніторингу транзакцій, що забезпечило зниження рівня шахрайських операцій на 30% [4, с. 112].

Проте, попри успіхи, більшість існуючих рішень стикається з рядом обмежень. Наприклад, традиційні системи часто не можуть обробляти великий обсяг даних у реальному часі, що є критично важливим для сучасних платформ. Крім того, висока кількість хибнопозитивних результатів створює додаткові перешкоди для користувачів, знижуючи їхню довіру до платформи [5, с. 45–47].

Графові моделі, такі як PageRank, стали важливим інструментом для виявлення зв'язків між транзакціями. Вони дозволяють ідентифікувати складні шахрайські схеми, які залишаються невидимими для традиційних методів. Проте ці моделі вимагають високих обчислювальних ресурсів і ретельної інтеграції з іншими технологіями [6, с. 56].

Рішення, які використовуються сьогодні, часто обмежені через вузьку спрямованість і недостатню адаптацію до багатоканального середовища. У цьому контексті постає необхідність створення нової системи, здатної інтегрувати дані з різних джерел – мобільних додатків, вебплатформ, фізичних точок продажу – для формування єдиного профілю користувача. Такий підхід дозволяє значно підвищити точність виявлення шахрайських дій, скоротити фінансові втрати та збільшити рівень довіри клієнтів.

Зміни ландшафту загроз стали реальним викликом цифровій безпеці і потребують впровадження дієвих і ефективних заходів. Світові лідери фінансового сектора вже демонструють значні успіхи в упровадженні антифрод-рішень. Зокрема, Mastercard впровадила систему Decision Intelligence, що дозволила знизити втрати від шахрайства на 30% завдяки використанню штучного інтелекту для аналізу транзакцій у реальному часі (Tranzzo, 2023). Компанія JPMorgan Chase використовує інструменти штучного інтелекту для аналізу поведінкових патернів клієнтів, щорічно скорочуючи втрати від шахрайства на понад 50 мільйонів доларів (Fintech Insider, 2023). А відома платформа PayPal застосовує алгоритми машинного навчання, що знизили втрати від шахрайства на понад 60% у деяких сегментах бізнесу (Website Rating, 2023).

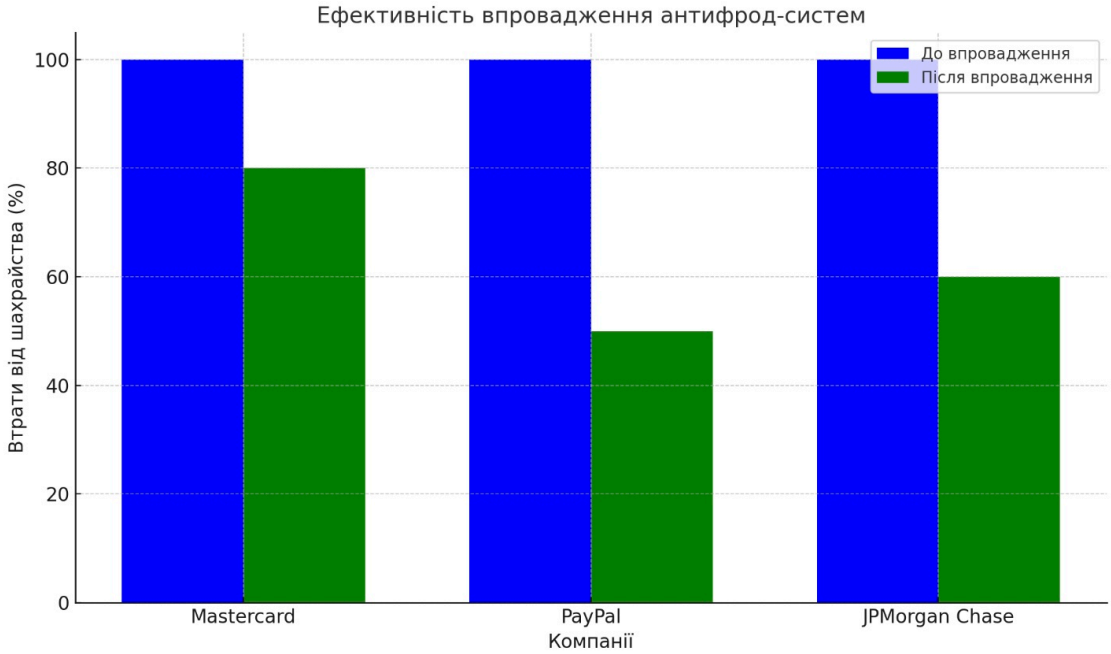


Рис. 2.

Рисунок 2 ілюструє зміни втрат до і після впровадження антифрод-систем у провідних фінансових компаніях.

В основу технології антифрод-рішень покладені наступні принципи:

1. Збір даних: Інтеграція транзакційних даних, поведінкових патернів і геолокації дозволяє створити багатовимірний профіль користувача.

2. Аналіз аномалій: Автоенкодери, ізоляційні ліси та методи опорних векторів (Random Forest і Gradient Boosting) ефективно ідентифікують підозрілу активність.

3. Реакція в реальному часі: Миттєве блокування підозрілих операцій мінімізує втрати, зменшуючи кількість хибнопозитивних результатів і покращуючи користувацький досвід.

Для досягнення високої точності виявлення шахрайства можуть використовуватися такі методи:

1. Збір та обробка даних: Інтеграція транзакцій, поведінкових патернів, геолокації, часових позначок. Дані проходять попередню обробку, яка включає очищення, нормалізацію, виявлення аномалій та створення нових характеристик (фічей), що покращують ефективність моделей.

2. Кластеризація: Для моделювання типових профілів користувачів застосовуються методи, такі як k-means і DBSCAN, що дозволяють групувати схожі поведінкові патерни.

3. Аналіз аномалій: Використання автоенкодерів, ізоляційних лісів і методів опорних векторів (Random Forest і Gradient Boosting) допомагає ідентифікувати підозрілі дії.

4. Часові ряди: Для врахування історичних даних і прогнозування майбутніх загроз застосовуються LSTM-мережі та ARIMA.

5. Класифікація: Алгоритми, такі як логістична регресія, , застосовуються для прогнозування ризику шахрайства.

Зазначимо, що графові моделі забезпечують виявлення прихованих зв'язків між транзакціями, допомагаючи виявляти складні схеми шахрайства. Регуляризація моделей та їх адаптація до нових даних здійснюється за допомогою крос-валідації та інших оптимізаційних технік. Проактивний підхід до побудови системи передбачає прогнозування загроз на основі аналізу історичних даних і поведінкових патернів, що дозволяє забезпечити високу ефективність запобігання шахрайству, зменшуючи ймовірність реалізації потенційних загроз (Fintech Insider, 2023). При цьому біометрична автентифікація (розпізнавання обличчя, відбитків пальців, голосу тощо) додає ще один рівень захисту, роблячи шахрайські дії майже неможливими (Tranzzo, 2023).

При запропонованій моделі побудови системи в цілому крос-канальні антифрод-системи демонструють високу масштабованість і модульність. Вони здатні адаптуватися до будь-яких обсягів транзакцій, забезпечуючи стабільність і точність навіть за умов пікових навантажень. Модульність дозволяє інтегрувати нові функції для аналізу,

зокрема машинне навчання, графові моделі чи технології штучного інтелекту. Важливим аспектом побудови таких систем є спрямованість на зменшення хибнопозитивних результатів, що дозволяє уникати помилкових блокувань законних транзакцій. Це в цілому покращує користувацький досвід, підвищує довіру до системи і мінімізує операційні витрати.

Високий рівень автоматизації і здатність до навчання в режимі реального часу роблять ці системи важливим інструментом захисту для фінансових платформ, що постійно стикаються з новими викликами в умовах цифрової економіки.

Таким чином, максимізація інтегрального показника ефективності $\boldsymbol{I}$, який характеризує здатність системи виявляти шахрайські дії, мінімізуючи при цьому кількість хибнопозитивних результатів та операційні витрати, можна представити в загальному вигляді

$$\boldsymbol{I} = f(\boldsymbol{X}, \boldsymbol{Y}, \boldsymbol{Z})$$

де:

$\boldsymbol{X}$ – вектор внутрішніх параметрів системи;

$\boldsymbol{Y}$ – вектор зовнішніх параметрів багатоканального середовища;

$\boldsymbol{Z}$ – вектор ресурсів системи (обчислювальні, фінансові тощо);

$f(.)$ – визначений функціонал залежності параметрів моделі, як правило, методом експертних оцінок.

При цьому вектор внутрішніх параметрів системи ($\boldsymbol{X}$) може враховувати наступні компоненти: поведінкові патерни (x_1); геолокаційні дані (x_2); часові мітки (x_3); методи кластеризації, аналізу аномалій та часових рядів (x_4, x_5, x_6); точність моделей класифікації (x_7); швидкість обробки даних (x_8) та інші, в залежності від особливостей системи.

Вектор зовнішніх параметрів багатоканального середовища ($\boldsymbol{Y}$) включає джерела даних, такі як: мобільні додатки (y_1); веб-платформи (y_2); фізичні точки продажу (y_3); транзакційні системи (y_4); біометричні сенсори (y_5); соціальні мережі (y_6); вразливості хакерських атак (y_7); інші канали, що впливають на профіль користувача (y_8).

В підсумку цільова функція має наступний вигляд

$$\boldsymbol{I} = \max\left\{\sum_{t=1}^{T} \alpha_t \cdot \boldsymbol{Q}_t - \beta_t \cdot \boldsymbol{Z}_t - \gamma_t \cdot \boldsymbol{C}_t\right\},$$

де:

$\boldsymbol{Q}_t$ – частка вірно виявлених шахрайських дій (True Positive Rate);

$\boldsymbol{Z}_t$ – частка хибнопозитивних результатів (False Positive Rate);

$\boldsymbol{C}_t$ – витрати на обробку даних за час t;

$\alpha_t, \beta_t, \gamma_t$ – вагові коефіцієнти, що враховують пріоритетність цілей.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз основних методів та алгоритмів, які використовуються для побудови сучасних антифрод-систем у багатоканальних середовищах. Особливу увагу приділено підходам до кластеризації, класифікації, аналізу часових рядів, графових моделей, векторизації даних, регуляризації моделей, оптимізації та прогнозування. Кожна з представлених методик спрямована на вирішення конкретних завдань, пов'язаних із виявленням шахрайства, зменшенням розмірності даних, підвищенням точності прогнозів та оптимізацією роботи моделей машинного навчання.

Виклад основного матеріалу. Найбільш відомими методами, які використовуються при побудові антифрод-систем можна вважати наступні.

1. **Кластеризація** використовується для класифікації користувачів за поведінкою і підходить для сегментації даних.

Метод **K-means** зазвичай передбачає наступний алгоритм:

а) Вибір кількості кластерів k (кожен із яких має власний центроїд).

б) Ініціалізація центрів кластерів $\mu_1, \mu_2, \ldots, \mu_k$.

в) Призначення кожної точки даних до найближчого центру кластера:

$$c_i = \arg\min_j x_i - \mu_j^2$$

г) Оновлення центрів кластерів:

$$\mu_j = \frac{1}{|C_j|} \sum_{x_i \in C_j} x_i$$

д) Повторення кроків в) – г) до збіжності.

Метод **DBSCAN** дозволяє виявляти аномалії (шум) та кластеризувати дані з нерівномірною щільністю (наприклад, для розпізнавання патернів шахрайства). При цьому загальний алгоритм передбачає:

а) Вибір параметрів ϵ (радіус) та minPts (мінімальна кількість точок).

б) Визначення точок як основних, граничних або шумових.

в) Формування кластерів шляхом об'єднання основних точок, які знаходяться в межах ϵ одна від одної.

2. **Класифікація** використовує статистичну обробку результатів для подальшого аналізу з метою прийняття рішення.

Логістична регресія це статистичний метод, який використовується для бінарної класифікації, тобто передбачення двох можливих результатів (наприклад, «шахрайство» або «норма»), в основі якого закладено:

а) Модель:

$$P(y=1x)=\frac{1}{1+e^{-(\beta_0+\beta_1 x_1+\ldots+\beta_p x_p)}}$$

б) Оцінка параметрів за допомогою максимізації правдоподібності, яка виявляє ознаки шахрайства, прогнозування ризиків та ранжування об'єктів за ймовірністю певної дії (шахрай/норма).

Метод **SVM (Support Vector Machine) –** метод машинного навчання, який використовується для задач класифікації, регресії та виявлення аномалій. Послідовність застосування:

а) Вибір ядра (лінійне, поліноміальне, RBF).

б) Розв'язання задачі оптимізації:

$$\min_{\mathbf{w},b}\frac{1}{2}\quad \mathbf{w}\ ^2+C\sum_{i=1}^{n}\xi_i$$

з умовами:

$$y_i\left(\mathbf{w}\cdot\mathbf{x}_i+b\right)\geq 1-\xi_i,\xi_i\geq 0$$

Широко застосовується у фінансовій сфері для виявлення шахрайства, аналізу платоспроможності, прогнозування ризиків, а також для розпізнавання обличчя, тексту тощо.

3. **Аналіз часових рядів** передбачає роботу з даними, які впорядковані за часом, з метою виявлення закономірностей, трендів і сезонності. У задачах боротьби з шахрайством часові ряди допомагають: аналізувати патерни поведінки користувачів (наприклад, регулярність транзакцій, геолокація, часові відмітки), виявляти аномалії у поведінці, які можуть свідчити про шахрайські дії та прогнозувати ризики майбутніх шахрайських операцій на основі історичних даних. При цьому основними інструментами є:

Модель **ARIMA** (Autoregressive Integrated Moving Average), основна ідея якої полягає у визначені автокореляції (**AR**) між поточним значенням ряду та попередніми, інтеграції (**I**) шляхом обчислення різниць між послідовними значеннями та обчисленні середнього змінного (**MA**) для впливу помилок прогнозу попередніх періодів. Включає в себе

а) Вибір параметрів p,d,q для моделі ARIMA (p, d, q).

б) Оцінка параметрів моделі:

$$y_t=c+\phi_1 y_{t-1}+\ldots+\phi_p y_{t-p}+\theta_1\epsilon_{t-1}+\ldots+\theta_q\epsilon_{t-q}+\epsilon_t$$

Модель **LSTM (Long Short-Term Memory)** це тип рекурентної нейронної мережі (RNN), яка здатна обробляти довгі часові залежності, основною перевагою якої є можливість працювати як із лінійними, так і з нелінійними даними. Передбачає

а) Побудову нейронної мережі з LSTM-шарами.

б) Навчання мережі на часових рядах для прогнозування.

4. **Графові моделі** використовуються для аналізу об'єктів і їх взаємозв'язків у вигляді графів (вузли – об'єкти, ребра – зв'язки). Суттєвими перевагами таких моделей слід вважати: відображення складних структур, які неможливо чітко описати за допомогою традиційних табличних моделей; виявлення прихованих залежностей, які можуть вказувати на шахрайську активність (наприклад, схеми відмивання коштів); гнучкість для даних із неоднорідною структурою (нерівномірні зв'язки, різна щільність даних); прогнозування в частині майбутніх зв'язків, наприклад, між транзакціями або учасниками фінансових операцій, а також широкий спектр алгоритмів, таких як PageRank, Random Walks, чи кластеризація графів для виявлення аномалій та аналізу ризиків.

5. Багатовимірна **векторизація даних** як процес представлення даних у вигляді векторів у багатовимірному просторі для аналізу, класифікації чи візуалізації. Основними методами є:

а) PCA (Principal Component Analysis) для зменшення розмірності.

б) Векторизація текстових даних за допомогою методу TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency), який оцінює значущість слова в документі відносно його частоти в усій колекції документів (прямий та інверсний) або Word2Vec – нейронної мережі, яка перетворює слова в багатовимірні вектори, де схожі слова знаходяться ближче одне до одного у векторному просторі.

У контексті боротьби з шахрайством ці методи дозволяють аналізувати як числові, так і текстові дані, забезпечуючи багатовимірний підхід до виявлення ризиків.

6. **Регуляризація моделей**

Використання L1 (Lasso) або L2 (Ridge) регуляризації для зменшення переобучення:

для L1 $$\min_{\beta}\left(\sum_{i=1}^{n}\left(y_i-\beta_0-\sum_{j=1}^{p}\beta_j x_{ij}\right)^2+\lambda\sum_{j=1}^{p}\left|\beta_j\right|\right)$$

та

для L2 $$\min_{\beta}\left(\sum_{i=1}^{n}\left(y_i-\beta_0-\sum_{j=1}^{p}\beta_j x_{ij}\right)^2+\lambda\sum_{j=1}^{p}{\beta_j}^2\right)$$

При цьому L1-регуляризація видаляє несуттєві ознаки (спрощує модель), а L2-регуляризація

контролює величину коефіцієнтів, запобігаючи переобученню. Гіперпараметр λ визначає силу штрафу (збалансовує точність і складність моделі).

7. **Оптимізація за допомогою градієнтного спуску –** оптимізаційний алгоритм, який використовується для мінімізації функції втрат $L(\beta)$ шляхом ітеративного оновлення параметрів моделі β у напрямку її зменшення. Формула оновлення параметрів має вигляд:

$$\beta := \beta - \eta \nabla L(\beta)$$

де η – швидкість навчання, $L(\beta)$ – функція втрат, $\nabla L(\beta)$ – градієнт функції втрат (вектор частинних похідних).

Може застосовуватися для оптимізації антифрод-моделей через використання градієнтного спуску для мінімізації функцій втрат у моделях класифікації (логістична регресія, нейронні мережі) чи аналізу часових рядів (LSTM), для підлаштування параметрів регуляризації з метою знаходження оптимального β, які враховують штрафи L1 або L2 регуляризації, а також використання адаптивних методів для складних даних і нелінійних задач боротьби з шахрайством за рахунок адаптивних варіантів градієнтного спуску (Adam, Nadam), які автоматично налаштовують швидкість навчання.

Вважається основним методом для налаштування параметрів у сучасних моделях. У дослідженнях боротьби з шахрайством він дозволяє створювати більш точні моделі для ідентифікації ризиків та підозрілих транзакцій, ефективно мінімізуючи функції втрат і запобігаючи переобученню.

8. **Прогнозування** – це ключовий етап у боротьбі з шахрайством, який дозволяє моделювати залежності між змінними та передбачати ризики. Використовуються Байєсівські мережі та ансамблеві методи, які на даний час є потужними інструментами для створення точних моделей прогнозування.

Байєсівські мережі – це графові моделі, які представляють залежності між змінними у вигляді орієнтованого ациклічного графу (вузли – змінні, ребра – залежності). Вони базуються на теоремі Байєса для обчислення ймовірностей. Передбачають виконання наступних етапів:

а) Побудова графу, за якою визначається структура мережі, яка показує причинно-наслідкові зв'язки між змінними. Наприклад, у фінансових транзакціях змінні можуть включати: суму операції, частоту транзакцій, геолокацію тощо.

б) Обчислення на основі теореми Байєса апостеріорних ймовірностей певної події (наприклад, шахрайства) з урахуванням наявних даних. Суттєвою превагою такого метода є можливість інтуїтивного моделювання залежностей та можливість працювати з неповними даними.

Ансамблеві методи поєднують кілька моделей (учнів) для покращення точності прогнозів. Вони дозволяють зменшити ризик переобучення та підвищити узагальнюваність.

а) Random Forest полягає в побудові ансамблю незалежних дерев рішень, кожне з яких прогнозує результат. При цьому кінцевий прогноз є середнім (у разі регресії) або голосуванням (у разі класифікації) між прогнозами всіх дерев:

$$\text{Прогноз} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \text{Прогноз}_i$$

б) Gradient Boosting застосовує послідовне побудування слабких моделей (учнів), кожна з яких покращує результати попередньої.

Формула оновлення моделі::

$$F_m(x) = F_{m-1}(x) + \eta h_m(x)$$

де $h_m(x)$ – новий слабкий учень, η – швидкість навчання.

Ці кроки забезпечують комплексний підхід до побудови антифрод-системи, яка може ефективно виявляти шахрайські дії в багатоканальних середовищах.

Нижче наведено приклад результатів кластеризації даних.

Графік кластеризації k-means демонструє кілька ключових аспектів, які мають безпосереднє відношення до роботи антифрод-систем.

По-перше, він показує сегментацію транзакцій або поведінки користувачів, де точки, згруповані в кластери, представляють групи з подібними характеристиками. У контексті антифрод-систем це може свідчити про типові операції, які відповідають нормальній поведінці користувачів, або незвичайні операції, які виділяються та можуть сигналізувати про шахрайство.

По-друге, на графіку можна виявити аномалії, які представлені точками, що знаходяться далеко від основних кластерів або не відповідають жодній групі. Ці аномалії часто потребують додаткової перевірки, адже можуть вказувати на підозрілу активність.

По-третє, графік дозволяє оцінити розподіл ризиків. У реальній антифрод-системі це означає, що кожен кластер може бути асоційований із певним рівнем ризику, наприклад, низьким для типових транзакцій, середнім для транзакцій

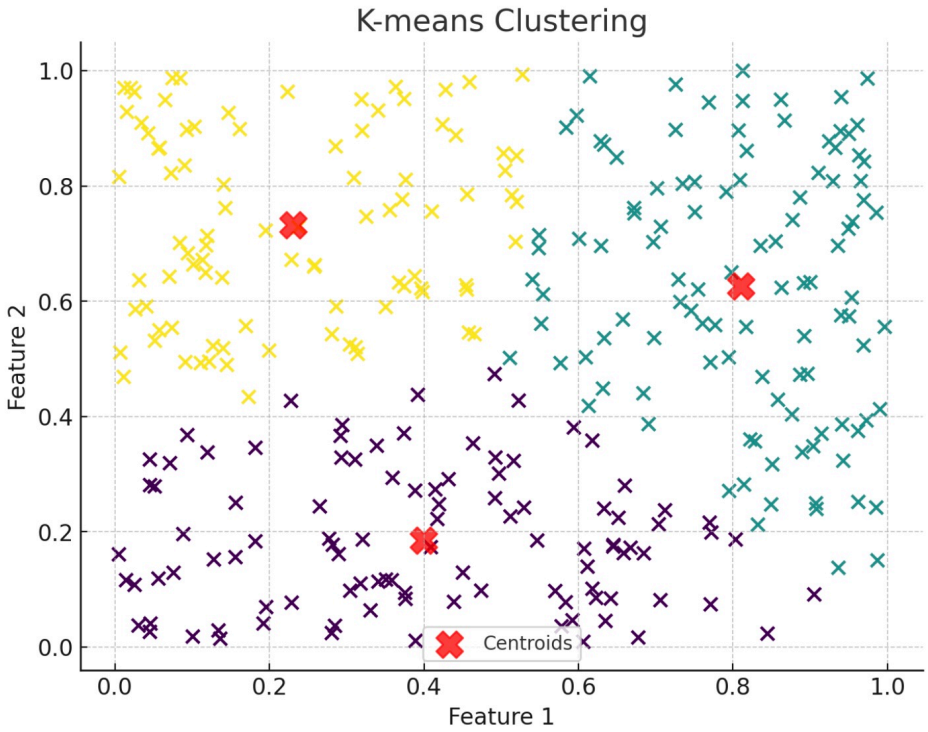


Рис. 3.

з деякими відхиленнями та високим для явних аномалій або нових типів шахрайських схем. Крім того, графік ілюструє, як алгоритм працює з багатоканальними даними. Якщо дані надходять із різних платформ, таких як мобільні додатки, веб-сайти чи банкомати, кластеризація дозволяє інтегрувати ці дані та створювати єдині групи, що є важливим для крос-платформних антифрод-систем. Центроїди кластерів, які відображаються на графіку, також свідчать про ефективність кластеризації. Якщо центроїди розташовані далеко один від одного, це свідчить про чітке розділення кластерів, що є корисним для аналізу різних типів поведінки. У підсумку, графік ілюструє, як антифрод-система може використовувати кластеризацію для автоматичного виявлення шахрайських дій та аномальної поведінки, що значно підвищує безпеку транзакцій та мінімізує втрати.

Таке представлення функціонування, як кластеризація даних за допомогою алгоритму k-means, може суттєво полегшити взаємодію з нейронними мережами в контексті побудови антифрод-систем завдяки кільком ключовим аспектам.

По-перше, попереднє групування даних у кластери дозволяє зменшити складність моделі нейронної мережі, оскільки вона працює вже з сегментованими наборами даних, що спрощує процес навчання. Це особливо актуально у випадках із великими багатовимірними даними, коли нейронна мережа може витрачати значні ресурси на обробку нерівномірних чи хаотично структурованих даних.

По-друге, використання кластеризації може забезпечити додатковий рівень інтерпретованості даних для нейронної мережі. Кластери, отримані через k-means, можуть слугувати як попередні мітки для наглядового навчання або створювати структуру, яка підвищує точність моделі за рахунок обмеження простору можливих результатів. Наприклад, замість навчання моделі на всіх даних одночасно, кожен кластер може оброблятися окремо, що підвищує локальну адаптивність і дозволяє нейронній мережі краще враховувати специфіку даних у межах кожного сегменту.

По-третє, кластеризація спрощує процес виявлення аномалій, які є важливими для антифрод-систем. Нейронні мережі, як правило, добре працюють із типізованими та частими патернами поведінки, проте кластеризація дозволяє виділити точки, які не відповідають жодному кластеру. Ці аномалії можуть бути передані в спеціалізовані підмережі для глибшого аналізу, що знижує ймовірність пропуску шахрайських дій.

Крім того, кластеризація покращує управління даними для багатоканальних систем. У крос-платформній антифрод-системі дані часто мають

різні джерела та структуру, що ускладнює їх обробку нейронними мережами. Попередня кластеризація дозволяє нейронній мережі отримати стандартизований, упорядкований набір даних із попередньо виявленими взаємозв'язками, що знижує обчислювальні витрати та підвищує продуктивність.

Нарешті, використання кластеризації сприяє розробці більш стійких до змін систем. У випадку появи нових шахрайських сценаріїв, які змінюють характер транзакцій, нейронна мережа може швидко адаптуватися за рахунок оновлення кластерів і локального навчання в межах змінених сегментів, що дозволяє підтримувати високий рівень точності без необхідності повного перенавчання.

Таким чином, інтеграція алгоритмів кластеризації, таких як k-means, у взаємодію з нейронними мережами створює більш ефективну та гнучку систему для боротьби з шахрайством у цифровій економіці.

Висновки. Крос-канальні антифрод-системи є потужним інструментом для забезпечення безпеки цифрової економіки завдяки використанню сучасних технологій, таких як машинне навчання, кластеризація, аналіз великих даних, прогнозування та адаптація до нових загроз. Вони інтегрують багатоканальні дані, включаючи транзакційну активність, поведінкові патерни та геолокацію, створюючи цілісні профілі користувачів. Такі системи забезпечують реакцію в реальному часі, мінімізують кількість хибнопозитивних результатів і дозволяють прогнозувати шахрайські дії, що є ключовими факторами для зменшення економічних втрат.

Кластеризація, зокрема алгоритм k-means, відіграє важливу роль у роботі таких систем, оскільки дозволяє сегментувати транзакції та виявляти аномалії. Це спрощує аналіз і забезпечує ефективну взаємодію з нейронними мережами, які можуть використовувати результати кластеризації для покращення точності та зниження складності моделі. Кластери допомагають виділяти типові, ризикові та підозрілі операції, дозволяючи оптимізувати ресурси системи та підвищувати якість її роботи.

Крос-платформні антифрод-системи також покращують обробку багатоканальних даних, стандартизуючи їх та інтегруючи в єдину модель. Це забезпечує високу ефективність навіть у складних умовах зростання обсягів операцій. Крім того, кластеризація спрощує управління адаптацією системи до нових загроз і сценаріїв шахрайства, дозволяючи швидко оновлювати моделі без втрати якості роботи.

Таким чином, крос-канальні антифрод-системи демонструють високу ефективність у боротьбі з шахрайством завдяки комплексному підходу до аналізу даних, використанню кластеризації, прогнозних алгоритмів і адаптації до нових викликів. Це робить їх незамінними інструментами для забезпечення стабільності та безпеки цифрової економіки.

Розглянуті системи відкривають нові можливості для забезпечення безпеки цифрової економіки, але їх впровадження супроводжується викликами. Одним із ключових питань є конфіденційність даних, які обробляються в межах антифрод-систем. Зокрема, споживачі цифрових послуг можуть висловлювати занепокоєння щодо обсягу та типу даних, які збираються. Крім того, адаптивність алгоритмів машинного навчання є критично важливою, але нові шахрайські сценарії можуть залишатися нерозпізнаними на ранніх етапах. Впровадження таких систем також є ресурсомістким, що може обмежувати їхню доступність для малих цифрових підприємств.

Підсумок. Шахрайство у цифровій економіці стає дедалі серйознішою загрозою, оскільки фінансові втрати через кіберзлочини зростають експоненційно. Розвиток технологій створює нові можливості для зловмисників, одночасно викликаючи потребу у впровадженні інноваційних антифрод-систем. Ефективність таких систем багато в чому визначається їхньою здатністю використовувати сучасні методи аналізу даних, алгоритми машинного навчання та штучний інтелект.

Як стверджують Smith і Brown [8, с. 45–67], адаптивність алгоритмів машинного навчання дозволяє швидко реагувати на нові загрози. Водночас вони наголошують на важливості якісних даних, адже без їхньої достатньої кількості навіть найсучасніші методи втрачають свою ефективність.

Сфера електронної комерції є особливо чутливою до шахрайства, адже великі обсяги транзакцій створюють додаткові ризики для компаній і споживачів. Johnson [9, с. 34–56] акцентує увагу на тому, що сучасні антифрод-рішення допомагають зменшити кількість хибнопозитивних блокувань, що є надзвичайно важливим для збереження лояльності клієнтів. Проте впровадження таких систем залишається дорогим задоволенням, особливо для малих і середніх підприємств. Таким чином, розробка доступних і масштабованих рішень є одним із ключових викликів, що вимагає уваги дослідників.

Іншим важливим аспектом ефективних антифрод-систем є інтеграція даних із багатоканальних платформ. Як зазначають Lee і Kim [10, с. 78–91],

поведінкова аналітика відіграє важливу роль у створенні динамічних профілів користувачів, які дозволяють виявляти аномалії в транзакціях. Використання даних із мобільних додатків, веб-платформ, фізичних точок продажу та інших каналів сприяє підвищенню точності систем. Однак такий підхід потребує значних обчислювальних ресурсів та ретельного налаштування алгоритмів для забезпечення їхньої ефективності.

Водночас проблема конфіденційності даних є ще одним важливим викликом, адже збір і аналіз великих обсягів інформації про користувачів викликає занепокоєння щодо їхнього захисту. Забезпечення балансу між ефективністю антифрод-систем і дотриманням прав на приватність є одним із ключових питань сучасних досліджень. Крім того, висока складність і обчислювальні витрати, необхідні для реалізації передових алгоритмів, можуть стати перешкодою для їх масштабного впровадження.

Перспективи подальших досліджень у цій галузі є надзвичайно широкими. Інтеграція багатоканальних даних, розробка дешевших рішень для малого бізнесу, а також підвищення точності алгоритмів за одночасного зниження їхньої складності є ключовими напрямками роботи. Сучасні технології відкривають унікальні можливості для адаптації антифрод-систем до нових загроз, однак успіх їхньої реалізації залежить від здатності знайти баланс між ефективністю, доступністю та конфіденційністю.

У підсумку, боротьба з шахрайством у цифровій економіці вимагає міждисциплінарного підходу, який поєднує технічну досконалість із дотриманням етичних стандартів. Інтеграція штучного інтелекту, поведінкової аналітики та багатоканального підходу дозволяє не лише підвищити ефективність протидії кіберзагрозам, а й створити стійкі технологічні рішення, які відповідають викликам сучасного світу.

Список літератури:

1. Tax N., de Vries K. J., de Jong M., Dosoula N., van den Akker B., Smith J., Thuong O., Bernardi L. Машинне навчання для виявлення шахрайства в електронній комерції: дослідницький порядок денний. У Deployable Machine Learning for Security Defense. Springer, 2021, с. 30–54. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-87839-9_2 (дата звернення: 18.12.2024).

2. Damayanti R., Adrianto Z. Машинне навчання для виявлення шахрайства в електронній комерції. Журнал облікових і бізнес-досліджень Airlangga, 2023, том 2, вип. 2, с. 1562–1577. URL: https://doi.org/10.31093/jraba.v2i2.48559 (дата звернення: 18.12.2024).

3. Alomari Y. R. M., Sulaiman N. B., Ali S. H. Пояснювальне машинне навчання для виявлення шахрайства в реальному часі. У Explainable Artificial Intelligence in the Digital Sustainability. Springer, 2023, с. 1–15. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-63717-9_1 (дата звернення: 18.12.2024).

4. Fintech Insider. Кібершахраї стають активнішими в Україні та світі. Які інструменти вони використовують та як захиститися? 2023. URL: https://fintechinsider.com.ua/kibershahrayi-stayut-aktyvnishymy-v-ukrayini-ta-sviti-yaki-instrumenty-vony-vykorystovuyut-ta-yak-zahystytysya/ (дата звернення: 18.12.2024).

5. Tranzzo. Все про безпеку платежів: система антифрод та PCI DSS. 2023. URL: https://tranzzo.com (дата звернення: 18.12.2024).

6. Website Rating. 50+ статистик та тенденцій кібербезпеки на 2024 рік. 2023. URL: https://www.websiterating.com/uk/blog/research/cybersecurity-statistics-facts/ (дата звернення: 18.12.2024).

7. EMA. Матриця платіжного шахрайства. Перезавантаження: аналіз, тренди та прогнози 2022–2023. 2023. URL: https://www.ema.com.ua/news/matricja-platizhnogo-shahrajstva-perezavantazhennja-analiz-trendi-ta-prognozi-2022-2023/ (дата звернення: 18.12.2024).

8. Smith J., Brown L. Розширені методи виявлення шахрайства в цифровій економіці. Журнал запобігання шахрайству, 2023, том 19, вип. 3, с. 45–67.

9. Johnson R. Машинне навчання у запобіганні шахрайству для електронної комерції. Аналітика електронної комерції, 2022, том 15, вип. 2, с. 34–56.

10. Lee H., Kim S. Аналітика поведінки для багатоканальних платформ у цифровій економіці. Огляд цифрової економіки, 2021, том 10, вип. 4, с. 78–91.

Zvieriev V.P., Bushkov V.H. CROSS-CHANNEL ANTI-FRAUD SYSTEMS AS A TOOL FOR COMPREHENSIVE PROTECTION OF ELECTRONIC COMMUNICATIONS IN THE DIGITAL ECONOMY

The article addresses the problem of ensuring the security of electronic communications in the digital economy, which is associated with the growing number of fraudulent activities in the financial sector. The active proliferation of cyber fraud necessitates the development of modern anti-fraud systems capable of effectively preventing fraud in real-time. The main focus is placed on the use of cross-channel anti-fraud

systems that integrate machine learning, big data analytics, graph models, and time series analysis to achieve maximum efficiency.

The analysis in the article includes modern approaches to fraud detection, among which are clustering methods (k-means, DBSCAN), forecasting algorithms (ARIMA, LSTM), and graph models (PageRank) for analyzing structured data. Special attention is given to the integration of multi-channel data coming from mobile applications, web platforms, and physical points of sale. This approach allows for the creation of a unified user profile, enabling more accurate anomaly detection. Emphasis is also placed on optimizing algorithms, reducing the number of false positives, and improving system scalability, which are critical criteria for their effectiveness.

The concept of a cross-channel anti-fraud system is proposed, which uses data from various sources, integrating them into a unified analytical space. The system implements the functionality of analyzing relationships between transactions, enabling the identification of hidden patterns, behavioral anomalies, and the prediction of potential risks. This is achieved through time series analysis, which accounts for behavioral patterns and evaluates changes in transaction dynamics.

The results of the study show that such systems significantly reduce financial losses from fraud, enhance the accuracy of identifying suspicious activities, and minimize the number of false blocks. Additionally, the system demonstrates flexibility and the ability to adapt to varying data volumes and new threats emerging in the digital environment.

The research makes a significant contribution to solving the problem of combating fraud in the digital economy. It is valuable for financial institutions, software developers, cybersecurity specialists, and researchers working in this field.

Key words: *anti-fraud system, cross-channel security, digital economy, machine learning, biometric authentication, digital threats.*

УДК 004.3:631.3 004.89:638.13
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/08

Іванишин В.В.
Національний університет харчових технологій

Мошенский А.О.
Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

ОНТОЛОГІЧНА СТРУКТУРА ТА ПАРАМЕТРИ ВИМИРІВ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПАСІКОЮ

Бджолина сім'я як складна соціальна система постійно взаємодіє з навколишнім середовищем, адаптуючись до його змін [1]. Базовими елементами ефективного управління пасікою є систематичний моніторинг стану бджолосім'ї та параметрів навколишнього середовища [2]. Такий процес є необхідним для створення оптимальних умов розвитку колонії для підвищення її продуктивності.

Частота вимірювання параметрів має бути оптимізована для балансу енергозбереження і залежить від динаміки життєвого циклу бджолосім'ї та сезонних змін у природному середовищі. У зимовий період, коли активність бджіл мінімальна, вимірювання можна здійснювати рідше. Натомість у весняно-літній сезон, коли бджолосім'ї демонструють високу активність, а робочі бджоли інтенсивно збирають нектар та пилок, частота вимірювань зазвичай зростає.

До основних вимірюваних параметрів, що можуть забезпечити реалізацію завдань системи керування пасікою належать: температура [3], вологість повітря [4], вага вулика [5], акустичний моніторинг [6], вміст CO_2 в вулику [7], активність льотної бджоли [8], рівень зовнішнього шуму та кліматичні параметри зовнішнього середовища.

Інтеграція цих параметрів в систему моніторингу забезпечить повноцінний аналіз стану бджолосімей та дозволить приймати науково обґрунтовані керівні рішення з оптимізації стану бджіл для підвищення продуктивності та здоров'я колоній, в тому числі в автоматизованому режимі. Використання сучасних технологій, зокрема бездротових сенсорів, дозволяє автоматизувати процеси збору даних та їх подальшого аналізу.

В статті запропонована онтологічна модель яка розкриває основні вимірювані параметри системи моніторингу, їх межі, сутність, взаємозв'язок і вплив на функціонування пасіки.

Розроблена онтологічна система управління пасікою слугує фундаментальною основою для подальших наукових досліджень і технологічних удосконалень в галузі автоматизації бджільництва. Її структурна універсальність дозволяє інтегрувати систему в масштабовані IoT-рішення, орієнтовані на сільськогосподарський сектор. Запровадження та практичне застосування запропонованої системи забезпечить істотне підвищення ефективності управління бджолиними господарствами, мінімізує ризики втрат колоній, оптимізує динаміку розвитку бджолосімей та сприятиме посиленню ефекту від запилення ентомофільних рослин, що має критичне значення для агроекосистем і глобальної продовольчої безпеки.

Ключові слова: *бджільництво, система, онтологія, моніторинг бджолосімей, автоматизація пасіки, інтернет речей (IoT), сенсори температури, сенсори ваги, пасіка, апіарій.*

Постановка проблеми: Бджільництво є важливою галуззю сільського господарства, яка забезпечує виробництво меду, прополісу, маточного молочка та інших продуктів, а також відіграє ключову роль у запиленні ентомофільних культур. З огляду на скорочення кількості бджолосімей та зниження виробництва виникає необхідність впровадження інноваційних технологій для ефективного управління пасіками та моніторингу стану бджіл [1].

Серед основних викликів сучасного бджільництва – високі витрати часу й ресурсів на обслуговування бджолосімей, що потребує постійної фізичної присутності пасічника. Це ускладнює управління великими пасіками та знижує продуктивність. Традиційні методи, як правило, не враховують можливості сучасних технологій, які здатні оптимізувати процеси моніторингу й управління [2]. З цією метою було розроблено та впроваджено низку автоматизованих систем моніторингу стану бджолиних сімей [9–13]. Однак, більшість існуючих систем мають обмеження, такі як висока вартість, недостатня адаптація до місцевих умов та обмежений функціонал. Це зумовлює потребу

в розробці нової системи, яка б враховувала особливості українського ринку і була доступною для малих та середніх пасік.

Ця робота спрямована на визначення та обмеження предметної області вимірювань системи керування пасікою та побудові і опису онтологічних взаємозв'язків для досягнення визначених цілей нової системи моніторингу бджолосімей, заснованої на сучасних бездротових технологіях і здатної забезпечити ефективний контроль за станом вуликів в реальному часі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сучасному етапі розвитку технологій для бджільництва існує багато різноманітних систем моніторингу стану бджолосімей, найбільш відомі: BroodMinder [9], Arnia [10], HiveTool [11], ApisProtect [12], BuzzBox [13]. Порівняльний аналіз яких [14] виявляє дефіцит науково обґрунтованих концепцій та відсутність системного підходу до інтегрованого розуміння складної системи моніторингу пасіки.

Важкість збору даних і велика тривалість досліджень у часі продукують грунт вузькоспрямованих досліджень окремих параметрів бджолиних сімей.

Важливість синтезу знань в галузі підтверджують дослідження науковців і біологів таких як В.О. Паливода, В.Ф. Соломка, Є.В. Руденко [15].

Онтологія у комп'ютерній лінгвістиці визначається як формалізований опис концептуалізації [16]. Її основне призначення – забезпечення обміну знаннями та їх повторного використання. У цьому контексті онтологія є формальною специфікацією концепцій та відносин, що існують у певній предметній області для конкретного агента або групи агентів. Це визначення поєднує дві ключові ролі онтології: як систематизованого набору визначень і як загального методу представлення знань.

Основні особливості онтології:

1) формалізація знань – онтологія чітко визначає концепції, об'єкти та відносини, що існують у конкретній сфері;

2) універсальність – семантика онтології не залежить від контексту або конкретного користувача, що дозволяє системам обмінюватися знаннями уніфікованим способом;

3) онтологічне зобов'язання – це домовленість використовувати визначений словниковий запас і формулювати запити відповідно до прийнятих правил онтології.

Таким чином, онтологія – це формальна і явна специфікація концептуалізації, яка забезпечує структуроване представлення знань, необхідне для їх послідовного використання та обміну.

Поняття онтології знань набуває практичної цінності в галузях штучного інтелекту, управління знаннями та розробки складних інформаційних та автоматизованих систем. Зростаюча складність предметних областей вимагає від фахівців чіткої структуризації та систематизації знань, що стосується їхніх конкретних сфер дослідження.

Постановка завдання. Основна мета формалізації знань полягає у створенні концептуальної моделі предметної області, яка відображає ключові сутності, поняття та взаємозв'язки між ними. Така схема забезпечує єдине трактування інформації, полегшує аналіз, обмін знаннями та інтеграцію даних у межах інтелектуальних систем.

Концептуалізація є основою онтології та визначається як абстрактне уявлення про світ, яке відображає спрощену модель реальності для досягнення певної мети. Вона включає об'єкти, сутності та зв'язки між ними, які важливі у конкретній галузі інтересу. У будь-якій системі на основі знань концептуалізація може бути як явною, так і неявною [17].

Формулювання завдання: Створити формалізовану онтологічну схему, яка б описувала ключові параметри та їх взаємозв'язки в системі моніторингу бджолосімей, з метою інтеграції знань та оптимізації процесів керування пасікою. Проаналізувати важливі аспекти діяльності пасічників, що потребують моніторингу. Це може включати в себе фізичні параметри, такі як температура, вологість, вага вулика, а також біологічні та соціальні показники бджолосім'ї, такі як акустична активність, стан бджіл, розвиток матки та кількість розплоду. Визначити основні об'єкти та сутності системи моніторингу.

Виклад основного матеріалу. Онтологія, як філософська категорія, формує основу для розуміння природи системи, її елементів та взаємозв'язків. У контексті моніторингу бджолосімей онтологічний підхід дозволяє описати об'єкт дослідження – бджолосім'ю – не як ізольовану одиницю, а як складну біотехнічну систему, що перебуває у постійній взаємодії з природним і техногенним середовищем.

Філософія науки вказує на важливість системного підходу, де об'єкт дослідження вивчається у цілісності (Гегелівська діалектика) та з урахуванням динамічних змін його складових.

Формування онтології системи моніторингу є способом фіксації онтологічних статусів параметрів, які відображають сутність та закономірності

функціонування бджолосімей. Для бджолосім'ї найвпливовішими є:

1) температура вулика – як фундаментальний параметр, що вказує на терморегуляційні процеси, пов'язані з виживанням колонії;

2) вага вулика – як показник продуктивності та енергетичного балансу системи;

3) акустична активність – як відображення соціального стану колонії, що є аналогом комунікаційних процесів у складних системах.

Таким чином, онтологія виступає механізмом репрезентації реальності у структурованому вигляді, що відповідає об'єктивним науковим методам.

Філософія техніки наголошує на тому, що будь-яка технологічна система є результатом експлікації знання про об'єкт дослідження. Побудова онтології дозволяє розрізнити суттєві та несуттєві параметри (на підставі онтологічної значущості та визначити логічні та причинно-наслідкові зв'язки між параметрами.

Гносеологічний аналіз через чітке визначення взаємозв'язків дозволяє здійснити інтерпретацію даних, що отримуються системою моніторингу, та забезпечити прогнозування поведінки системи.

Діалектичний підхід, сформульований у працях класиків філософії (Гегель, Маркс), дозволяє зрозуміти динаміку розвитку системи через категорії наступні категорії:

1) єдність та боротьба протилежностей – стабільність бджолосім'ї підтримується балансом між активністю колонії та впливом зовнішніх факторів;

2) перехід кількісних змін у якісні – незначні відхилення параметрів (наприклад, температури або вологості) можуть призвести до критичних станів системи;

3) заперечення заперечення – онтологія дозволяє побудувати механізми корекції (зворотний зв'язок), які «знімають» суперечності та забезпечують оптимальне функціонування системи.

Сучасна філософія техніки розглядає технічні системи як інструменти розширення людських можливостей (Гуссерль, Хайдеггер). У випадку моніторингу бджіл система стає інтерфейсом між людиною і природою, що забезпечує підвищення ефективності управлінських рішень, зменшення антропогенного впливу завдяки автоматизованому аналізу та мінімізації людського втручання та створення умов для гармонійної коеволюції технічних систем і біологічних об'єктів.

Побудова онтології в практичному вимірі має ключове значення для проектування систем прийняття рішень, оскільки вона сприяє формалізації знань про процеси в вулику, лежить в основі розробки алгоритмів обробки даних за допомогою машинного навчання і штучного інтелекту й створює умови для побудови експертних систем, які забезпечують своєчасну діагностику проблем та прогнозування стану бджолосімей.

З позицій філософії впровадження систем моніторингу бджолосімей є стратегічним інструментом для вирішення глобальних екологічних та технологічних викликів сучасності: воно сприяє збереженню біорізноманіття шляхом підтримки бджіл як ключових елементів екосистем, забезпечує раціональне використання ресурсів через оптимізацію продуктивності з мінімальними витратами та дозволяє контролювати техногенний вплив, мінімізуючи негативні наслідки промислової діяльності для довкілля.

Також, побудова онтології дозволяє легко адаптувати систему моніторингу до нових вимог або технологічних змін. Наприклад, при появі нових сенсорів можна додати їх у вже існуючу структуру, не змінюючи основну логіку системи та ґрунтовно визначити значущість нових параметрів і інтегрувати їх у систему прийняття рішень.

Опис онтології предметної області здійснюється через розробку терміносистеми, яка є організованим набором термінів, що відображають специфіку певної галузі знань. Така терміносистема створюється експертами на основі теоретичних положень і характеризується системністю, повнотою, несуперечливістю, відносною стабільністю, відкритістю та динамічністю[18].

Першим етапом розробки онтології предметної області «система керування пасікою» є формування термінологічного словника. Для цього ключові дефініції онтології представлені у структурованому вигляді в Таблиці 1.

Наступним етапом у процесі створення онтологічної системи є розробка базової графічної моделі семантичної мережі. Цей етап проілюструємо на прикладі фрагмента семантичної структури Рисунок 1.

Після ідентифікації ключових концептів доцільно побудувати ієрархію предметної області, базисом якої є терміносистема, а у вузлових елементах – відповідна номенклатура параметрів Рисунок 2.

Основні параметричні дані в системі надходять від датчиків температури, вологості і ваги. Періодичність вимірювань визначається динамікою розвитку бджолосім'ї та сезонними умовами. Взимку вимірювання можуть бути менш частими

Таблиця 1

Мінімальний термінологічний словник для уявлення наповнення онтології «система керування пасікою»

Термін	Дефініція	Онтологічна значущість	Властивості зв'язків	Властивості даних	Тип даних	Приклади індивідів
Бджолосім'я	Біологічна спільнота, що функціонує як єдиний організм з соціальною і функціональною ієрархією.	Центральний об'єкт онтології, що взаємодіє з природним середовищем та технічним оснащенням системи.	**Зв'язок**: знаходиться_у_вулику, **Відношення**: впливає_на_медозбір, пов'язана_з_температурою.	**Параметри**: кількість_бджіл, стан_матки, активність_літної_бджоли.	Ціле число, Реальне	Бджолосім'я_2025-01, Колонія_А1
Вулик	Технічна конструкція, що забезпечує життєдіяльність бджолосім'ї.	Матеріальний об'єкт системи моніторингу.	**Зв'язок**: містить_бджолосім'ю, має_сенсори, забезпечує_захист.	**Параметри**: вага, температура_всередині, рівень_вологості.	Реальне, Ціле число	Вулик_Даданн№ 1, Вулик_Лангстрот №2
Датчик	Технічний пристрій для збору параметрів стану вулика.	Засіб отримання даних для моніторингу.	**Зв'язок**: встановлений_у_вулику, передає_дані_системі.	**Параметри**: тип_датчика, точність_вимірювання, частота_вимірювань.	Текст, Реальне	Темп_Датчик_1, Акустичний_Сенсор_2
Температура вулика	Показник теплового стану внутрішнього середовища вулика.	Відображає терморегуляційні процеси колонії, критичний для виживання.	**Відношення**: впливає_на_активність_бджіл, залежить_від_сезону.	**Параметри**: значення_температури, межі_коливань.	Реальне	Температура_35°С, Температура_25°С
Акустична активність	Рівень звукової активності, що відображає соціальний стан колонії.	Параметр, що інтерпретує комунікаційні процеси всередині бджолосім'ї.	**Зв'язок**: корелює_з_температурою, сигналізує_про_стан_сім'ї та ативність маток	**Параметри**: частоти_шуму, інтенсивність_вібрації, акустична картина	Реальне	Акустика_200Гц, Акустика_500Гц
Вага вулика	Загальна маса вулика, що включає мед, бджіл та запаси.	Індикатор продуктивності та енергетичного балансу бджолосімї.	**Відношення**: залежить_від_медозбору, сигналізує_про_запаси та хворобливий стан	**Параметри**: значення_ваги, зміни_ваги_з_часом.	Реальне	Вага_50кг, Вага_60кг
Стан бджолосім'ї	Комплексний показник, що визначає здоров'я та активність колонії.	Ключовий узагальнений параметр для оцінки функціонування системи.	**Зв'язок**: визначається_параметрами, впливає_на_продуктивність.	**Параметри**: індекс_здоров'я, критичні_показники.	Реальне	Стан_Нормальний, Стан_Критичний
Пасічник	Суб'єкт, що здійснює управління системою моніторингу бджолосімей.	Людський фактор як елемент антропоцентричної системи.	**Відношення**: керує_системою, приймає_рішення, отримує_дані.	**Параметри**: досвід, кількість_вуликів_в_управлінні.	Текст, Ціле число	Пасічник_Іван, Пасічник_Марія
Моніторинг	Процес безперервного збору та аналізу даних про стан бджолосім'ї.	Центральний процес онтології, що забезпечує зворотний зв'язок та інтерпретацію даних.	**Зв'язок**: збирає_дані, аналізує_параметри, передає_інформацію.	**Параметри**: частота_збору_даних, кількість_контрольованих_параметрів.	Ціле число, Реальне	Моніторинг_День1, Моніторинг_Тиждень2
Медозбір	Процес накопичення нектару та виробництва меду бджолами.	Показник ефективності діяльності колонії.	**Зв'язок**: залежить_від_сезону, пов'язаний_із_активністю_бджіл.	**Параметри**: кількість_меду, тривалість_медозбору.	Реальне	Медозбір_10кг, Медозбір_20кг
Запилення	Процес перенесення пилку бджолами на рослини для їх запліднення.	Ключовий екологічний параметр, що визначає роль бджолосімей у біосфері.	**Зв'язок**: залежить_від_активності, підвищує_врожайність_рослин.	**Параметри**: інтенсивність_запилення, площа_оброблених_культур.	Реальне	Запилення_Поле1, Запилення_Поле2

Рис. 1. Спрощена графічна модель семантичної мережі

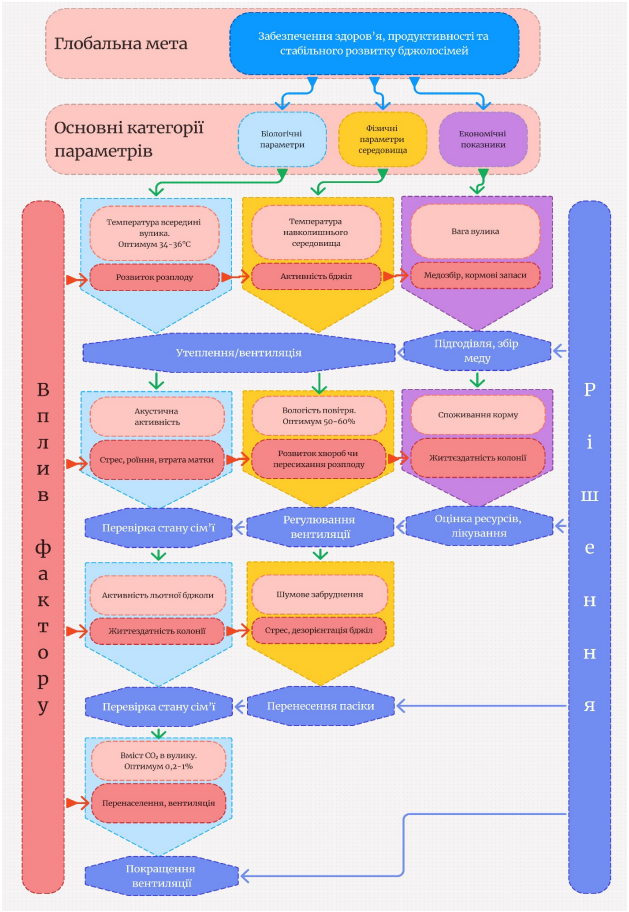


Рис. 2. Ієрархія предметної області онтології «система керування пасікою»

через низьку активність бджіл, тоді як у весняно-осінній період частота вимірювань зростає через інтенсивну діяльність бджіл.

Критичним показником стану бджолосім'ї є температура гнізда, яка є показником здоров'я і продуктивності. Оптимальний температурний режим забезпечує:

1) розвиток личинок – стабільна температура є необхідною для нормального росту; аномалії призводять до порушень розвитку;

2) терморегуляцію гнізда – бджоли активно підтримують температуру, а контроль дозволяє вчасно виявити дисбаланс;

3) активність бджіл – температурний режим впливає на роботу бджіл, включно зі збором нектару та пилку.

Оптимальна періодичність вимірювань встановлена емпірично: у літній період температуру слід контролювати кожні 15 хвилин, а взимку – два рази на добу.

Наступним показником по важливості є вага вулика. Контроль ваги дозволяє:

1) контролювати запаси меду – вагові зміни дають змогу оцінити кількість меду, планувати його відбір та своєчасно забезпечити підгодівлю;

2) оцінювати розвиток бджолосім'ї – добові коливання ваги свідчать про активність бджіл під час збору нектару та ефективність їхньої роботи;

3) прогнозувати стан бджолосім'ї – різке падіння ваги може сигналізувати про хвороби чи нестачу кормових запасів, що потребує оперативного реагування;

4) оптимізувати процес годування – дані про вагу допомагають визначати необхідність підгодівлі та регулювати її обсяги;

5) визначати потребу у весняному годуванні – зимові вимірювання дають змогу оцінити запаси корму та підготувати бджолосім'ю до весняного розвитку і почати його в оптимальний момент.

Оптимальна періодичність вимірювань встановлена емпірично: у літній період вагу слід контролювати щогодини, а взимку – один раз на добу.

Третім критичним показником є вологість в гнізді. Контроль вологості є важливим для запобігання грибкових захворювань, підтримання оптимальних умов для розвитку личинок та забезпечення продуктивності бджолосім'ї. Оптимальний рівень вологості забезпечує:

1) терморегуляцію – вища вологість підвищує ефективність охолодження гнізда;

2) збереження меду – запобігає кристалізації меду та втраті його поживних властивостей;

3) поведінку бджіл – низька вологість викликає стрес і знижує активність бджіл;

4) здоров'я личинок – надмірна вологість сприяє утворенню плісняви, що шкодить личинкам.

Коливання вологості в різні періоди року слугує вирішенню різних завдань. Так у весняно-літній період пріоритетом вимірювання вологості є підтримка активності бджіл та терморегуляції

гнізда. В осінній період вимірювання вологості дозволяє визначити умови зберігання корму і допомагає оптимізувати підготовку зо зими.

Небезпечні зміни вологості дозволяють системі шляхом сповіщення, або в автоматизованому режимі запобігти плісняві і оптимізувати терморегуляцію.

Вологість слід узгоджувати з температурними показниками для енергозбереження та здоров'я бджіл. Оптимальна періодичність вимірювань встановлена емпірично: один замір на годину взимку (грудень-лютий) та два заміри на годину в інші сезони.

Окрім наведеного оптимальний стан бджолосім'ї великою мірою залежить від зовнішніх метеорологічних параметрів. Для поліпшення прогностичної якості системи керування слід контролювати основні атмосферні параметри: температуру і вологість. Також можуть поліпшити наукові пошуки та якість системи такі метеорологічні параметри як атмосферний тиск, кількість опадів, сонячна активність.

Періодичність вимірювання метеорологічних факторів відповідає усталеному у галузі і становить один замір на 15 хвилин.

Висновки. Вперше запропонована побудова онтології процесу моніторингу бджолосімей, що не лише є технічним етапом, а фундаментальним філософсько-науковим завданням. Вона забезпечує системне пізнання, структуризацію знань, інтеграцію технічних і біологічних аспектів та формує основу для створення адаптивних інтелектуальних систем, що працюють у гармонії з природою. Таким чином, онтологія є ключовим елементом для розуміння та управління складними природно-технічними системами, якими є бджолосім'ї в умовах сучасного світу.

З позицій філософії впровадження систем моніторингу бджолосімей є стратегічним інструментом для вирішення глобальних екологічних та технологічних викликів сучасності: воно сприяє збереженню біорізноманіття шляхом підтримки бджіл як ключових елементів екосистем, забезпечує раціональне використання ресурсів через оптимізацію продуктивності з мінімальними витратами та дозволяє контролювати техногенний вплив, мінімізуючи негативні наслідки промислової діяльності для довкілля.

Нове рішення по аналізу параметрів і їх взаємозв'язків дає розуміння необхідності контролю на пасіках – температури, ваги та вологості – що є критичним для підтримання здоров'я та продуктивності бджолосімей. Температура гнізда забезпечує стабільний розвиток личинок, ефективну терморегуляцію та оптимальну активність бджіл. Встановлено, що в літній період її слід вимірювати кожні 15 хвилин, а взимку – двічі на добу. Вага вулика є ключовим показником запасів меду, розвитку бджолосім'ї та прогнозування її стану. Добові коливання ваги дозволяють оцінити ефективність збору нектару, вчасно виявити критичні зміни, такі як нестача корму чи хвороби, та оптимізувати процес годування. У літній період вагу слід контролювати щогодини, а взимку – один раз на добу.

Вологість гнізда впливає на терморегуляцію, збереження меду, активність бджіл і розвиток личинок. Підтримання оптимального рівня вологості дозволяє запобігти утворенню плісняви, яка є шкідливою для личинок. Взимку рекомендовано вимірювати вологість щогодини, а в інші періоди – двічі на годину. Окрім внутрішніх параметрів, важливо контролювати зовнішні метеорологічні умови, такі як температура, вологість, атмосферний тиск, кількість опадів і сонячна активність, що покращує прогностичну якість системи. Оптимальна періодичність вимірювань метеорологічних факторів становить 15 хвилин. Систематичний моніторинг цих показників забезпечує ефективний контроль стану бджолосімей та підвищує загальну продуктивність пасіки.

Тож можна вважати доцільним подальшу розробку онтологічної моделі «система керування пасікою» і реалізація її засобами спеціалізованого програмного забезпечення, зокрема Protégé [19].

Список літератури:

1. Winston M., The biology of the honey bee. London, England: First Harvard University Press, 1991.

2. Мікла І. А., Кісь В. М. Система контролю стану бджолиної сім'ї. *Матеріали МНПК «Інноваційні розробки в аграрній сфері», ХНТУСГ, ННІ МСМ*. 12–13 грудня 2019 року. С. 122–123.

3. Southwick E. E., Moritz R. F. A. Social Control of Thermoregulation in Honeybee Colonies. Naturwissenschaften, 1987.

4. Human, H. Influence of Temperature and Humidity on the Development of the Honeybee. Journal of Apicultural Research, 2006.

5. Meikle, W. G., et al. Monitoring Honeybee Colonies Using Digital Technologies. Apidologie, 2016.

6. Ferrari, S., et al. Monitoring of Honeybee Sounds. Journal of Apicultural Science, 2008.

7. Stalidzans, E. CO_2 Concentration as an Indicator of Colony Condition. Biosystems Engineering, 2017.

8. Reyes, A. E. Impact of Pesticides on Bee Foraging Behavior. Environmental Entomology, 2019.
9. Broodminer. URL: https://broodminder.com/ (дата звернення: 19.12.2024).
10. Arnia Remote Hive Monitoring. URL: http://www.arnia.co.uk/ (дата звернення: 19.12.2024).
11. HiveTool.Net. URL: http://hivetool.net/ (дата звернення: 19.12.2024).
12. ApisProtect. URL: https://apisprotect.com/ (дата звернення: 19.12.2024).
13. BuzzBox. URL: https://www.osbeehives.com/ (дата звернення: 19.12.2024).
14. Іванишин В. Мошенський А, Концепція автоматизованої системи моніторингу пасіки на основі технології LORA з використанням сенсорів реального часу. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки, Том 35 (74) № 5, частина 1. 2024. С. 149–153.
15. Руденко Є., Маслій І., Нємкова С., Основні напрями та шляхи розвитку бджільництва. Вісник аграрної науки. 2006. № 5. С. 40–42.
16. Gruber, T. Ontology. In: Liu, L., Özsu, M. (eds) Encyclopedia of Database Systems. Springer, New York, 2016.
17. Сілагін О. В., Денисюк В. О. Онтологічне моделювання бази знань з організації подорожей. Український журнал інформаційних технологій. 2022, т. 4, № 1. С. 44–52.
18. Іленков А. Термінологія та її роль у представленні знань / Анжей Іленков. *Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». Серія «Проблеми української термінології»*, 2009. № 648. С. 24–29.
19.Protégé URL: https://apisprotect.com/ (дата звернення: 19.12.2024).

Ivanyshyn V.V., Moshensky A.O. ONTOLOGICAL STRUCTURE AND PARAMETERS OF THE APIARY CONTROL SYSTEM MEASUREMENTS

The bee family as a complex social system constantly interacts with the environment, adapting to its changes. The basic elements of effective apiary management are the systematic monitoring of the state of the bee colony and environmental parameters. This process is necessary to create optimal conditions for colony development to increase its productivity.

The frequency of parameter measurements should be optimized for the balance of energy saving and depends on the dynamics of the bee colony life cycle and seasonal changes in the environment. In the winter, when bee activity is minimal, measurements can be made less frequently. Instead, in the spring and summer season, when bee colonies are highly active and worker bees are intensively collecting nectar and pollen, the frequency of measurements usually increases.

The main measured parameters that can ensure the realization of the tasks of the apiary management system include: temperature, air humidity, hive weight, acoustic monitoring, CO_2 content in the hive, flight bee activity, external noise level and climatic parameters of the environment.

The integration of these parameters into the monitoring system will provide a full analysis of the state of bee colonies and allow for scientifically based management decisions to optimize the condition of bees to increase productivity and colony health, including in an automated mode. The use of modern technologies, in particular wireless sensors, allows to automate the processes of data collection and their subsequent analysis.

The article proposes an ontological model that reveals the main measurable parameters of the monitoring system, their limits, essence, interconnection and level of influence on the functioning of the apiary.

The developed ontological apiary management system serves as a fundamental basis for further research and technological improvements in the field of beekeeping automation. Its structural versatility allows the system to be integrated into scalable IoT solutions focused on the agricultural sector. The implementation and practical application of the proposed system will significantly improve the efficiency of bee farm management, minimize the risk of colony loss, optimize the dynamics of bee colonies and enhance the effect of pollination of entomophilous plants, which is critical for agroecosystems and global food security.

Key words: *beekeeping, system, ontology, bee colony monitoring, apiary automation, Internet of Things (IoT), temperature sensors, weight sensors, apiary.*

UDC 004.93
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/09

Ilchuk M.S.
Lviv Polytechnic National University

A ROBUST BARCODE DETECTION SYSTEM WITH MACHINE LEARNING

Accurate and efficient barcode recognition is crucial across a range of industries, including logistics, retail, and healthcare. It facilitates the automated tracking of goods, streamlines inventory management, accelerates transaction times, and boosts overall system efficiency. Recent advances in deep learning have notably enhanced both the speed and precision of barcode recognition, enabling it to keep pace with the expanding requirements of large-scale commercial and industrial applications.

This article focuses on the design and refinement of a barcode recognition system leveraging state-of-the-art deep learning technologies, specifically targeting improvements in performance metrics critical to real-time and large-volume processing.

This study also examines how modern object detection and decoding algorithms can further optimize the recognition process. For this purpose, a system based on the YOLO-v5 algorithm has been developed and presented, which provides an average accuracy (mAP) of 96% at an Intersection over Union (IoU) threshold of 0.5 and reaches 97% in a wider range of IoU thresholds (from 0.5 to 0.95). In this paper it was revealed that this model allows you to accurately determine barcode regions even in large and mixed data sets, which is especially valuable for systems with a large flow of information. It was also found that for further processing and decoding it is advisable to use the Pyzbar library, which demonstrates an accuracy of 90% in converting detected barcodes into readable text. Such integration between YOLO-v5 and Pyzbar allows you to achieve high decoding efficiency, which is optimal for applications where speed, accuracy and reliability are required. The combination of these tools sets a new standard for both research and real-world applications in barcode recognition technology, creating a robust and flexible solution for automation in logistics, retail, healthcare, and other industries. The results presented in this article highlight the importance of integrating advanced object detection techniques with decoding tools to achieve optimal results.

Key words: *Large language models, Computer vision, Machine learning, YOLO-v5, Pyzbar, Barcode detection.*

Formulation of the problem. Barcode recognition systems are essential across various industries, aiding in efficient inventory management, product tracking, and checkout operations. While traditional approaches have served these needs, they often struggle with limitations in speed, accuracy, and adaptability, especially when facing diverse environments and varying barcode conditions. The introduction of deep learning and specialized libraries has driven significant progress in overcoming these hurdles. This study focuses on integrating YOLO-v5 with the Pyzbar library to develop a high-accuracy, efficient barcode recognition system. Known for its rapid detection and efficiency, YOLO-v5 excels in object recognition by processing everything in a single pass. Unlike older methods that need multiple steps, YOLO-v5 uses a single neural network to simultaneously predict bounding boxes and category probabilities, making it ideal for real-time applications. By harnessing its capabilities, this system effectively detects and localizes barcodes in a wide range of complex scenes. [1]. Complementing YOLO-v5, Pyzbar is a specialized library that decodes various barcode formats, such as QR codes, EAN, and UPC. Its lightweight, efficient design allows seamless integration with YOLO-v5, resulting in a comprehensive solution that reliably identifies and decodes barcodes with high accuracy [2]. This integration effectively tackles key challenges in barcode recognition, merging the robust detection abilities of YOLO-v5 with Pyzbar's decoding expertise. The result is improved accuracy in difficult scenarios, including low lighting, varied angles, and partially obscured barcodes, which enhances the system’s overall performance and reliability. The paper covers the integration process, performance evaluations, and a comparison with existing solutions, aiming to advance the development of more efficient and accurate barcode recognition systems. Such innovations promise benefits across a range of industrial applications.

Analysis of recent research and publications. Recent strides in deep learning and computer vision have notably enhanced the performance of barcode

recognition systems, boosting both their accuracy and efficiency. Researchers have been actively exploring various deep learning algorithms tailored for practical, real-world applications, extending the capabilities of barcode recognition across industries like logistics, autonomous driving, and retail. These efforts highlight the reliability of YOLO-based models, especially YOLO-v5, due to their adaptability and robustness under diverse conditions. For example, a recent study [3] compared several deep convolutional neural network (D-CNN) models, including YOLO-v5, YOLOx, EfficientDet, RetinaNet, and Faster R-CNN, using custom datasets that simulate real-world barcode scenarios, such as fluctuating lighting, rotation, and complex backgrounds. The results underscored YOLO-v5's superior performance in both speed and accuracy, making it the top choice for managing challenging detection tasks.

Another approach [4] combines deep learning with geometric techniques to enhance performance, particularly for high-resolution and complex barcode images. This hybrid method leverages YOLO's localization abilities alongside precise geometric segmentation, leading to a 5% improvement in accuracy over traditional techniques. This advancement supports real-time applications in industrial settings.

In different research [5], a developed QR code recognition system based on YOLO-v5, employing LabelImg for dataset annotation and data augmentation to refine accuracy. YOLO-v5s was opted here due to its balance between performance and computational efficiency, achieving approximately 90% precision – proving effective for real-time QR code recognition in augmented reality settings.

Another research [6] also contributed to this field by focusing on logistics, implementing an optimized barcode recognition system that combines YOLO-v5s for detection with the ZBAR algorithm for decoding. This integrated approach significantly enhanced accuracy and efficiency, particularly in varied lighting and under image distortions, reducing error rates and speeding up processing in logistics operations.

Collectively, these studies demonstrate the versatility and impact of YOLO-v5 and other deep learning models in advancing barcode recognition technology. Their findings set a promising benchmark for future applications across diverse sectors.

Task statement. The purpose of this article is to provide the method for development and evaluation the suggested system of automatic barcode recognition, along with the details of the experimental setup.

Outline of the main material of the study. This system begins with a preprocessing phase, where the dataset is prepared before the barcode detection stage. The system uses YOLO-v5 to detect barcodes within the dataset images, and then applies the Pyzbar Python library to decode the characters from the detected barcodes.

Barcode Detection Using YOLO-v5. YOLO-v5, introduced by Ultralytics in 2020, represents a significant improvement in the YOLO (You Only Look Once) series for real-time object detection. Built on the PyTorch framework, YOLO-v5 integrates several enhancements that boost both speed and accuracy. A key feature is the AutoAnchor algorithm, which optimizes anchor boxes for better alignment with the training dataset. The model's architecture includes innovations like the CSPDarknet53 backbone with a Stem layer, which reduces memory usage and computational load. Additionally, the Spatial Pyramid Pooling Fast (SPPF) layer aggregates features into fixed-size maps, speeding up the computation process. The model's neck architecture combines SPPF with a modified CSP-PAN, while the head incorporates elements of YOLO-v3 to ensure efficient object detection. To enhance model robustness, YOLO-v5 uses training augmentations such as Mosaic, MixUp, and HSV adjustments. The model comes in five versions-ranging from the lightweight YOLO-v5n to the high-performance YOLO-v5x – meeting different application needs and hardware capabilities [7].

Barcode Decoding Using Pyzbar. Pyzbar is a streamlined library designed specifically for effective decoding of both 1D and 2D barcodes. It define the barcode type and extracts the embedded data, enabling further processing for various purposes. The decoded data can be used in multiple ways, such as extracting and validating text, logging results for analysis, or automating workflows. Pyzbar supports a variety of barcode formats, such as EAN, QR codes, Code128, UPC and making it universal for use in document processing, automated data entry and inventory management [8] [9].

Experimental Setup. This research aims to assess the efficiency of an automatic barcode identification system by combining the strengths of YOLO-v5 for detection and Pyzbar for decoding. The experimental setup is structured around key components: dataset collection, preprocessing, model training, evaluation metrics, and testing methodology.

Dataset Collection. The dataset consists of 1,533 images of 1D barcodes captured by mobile cameras, featuring barcodes at various angles on common products. To simulate real-world conditions, the dataset includes images taken under different lighting and quality levels. For added

robustness, both high-quality images and those with significant degradation are incorporated, creating a comprehensive foundation for testing barcode recognition in real-world scenarios.

Dataset Preprocessing. Preprocessing was facilitated by the Roboflow platform, which applied data augmentation techniques to expand the dataset from 1,533 to 3,800 images. These transformations included adding noise (to 0.3%), blurring (to 2.5 pixels), rotating (in range of -15° to +15°), resizing images to 640x640, and adjusting brightness by ±24%. Augmentation helps reduce overfitting, enhancing the model's ability to generalize across diverse conditions. During annotation, barcode regions within each image were marked to guide the model during the training phase, a crucial step in supervised learning.

Model Training and Optimization. The YOLO-v5 model, based on the PyTorch deep learning framework, was chosen for its flexibility and ability to rapidly adapt through a dynamic computational graph, making it suitable for both research and production environments. Training was performed on a GPU-accelerated workstation, where key parameters like learning rate, batch size, and augmentation strategies were optimized to maximize performance.

Evaluation Metrics. The primary evaluation metric used in this study is Mean Average Precision (*mAP*), which combines precision and recall across various Intersection over Union (IoU) thresholds. The calculation of *mAP* consists of several key steps. Precision measures detection accuracy by calculating the ratio of true positives to total detections, while recall assesses the model's ability to identify objects, determined by the ratio of true positives to ground-truth objects. A precision-recall curve is plotted for each class by adjusting the confidence threshold, illustrating the balance between precision and recall. Average Precision (AP): The area below the precision-recall curve for each class is calculated as the AP, summarizing the system's precision-recall trade-off. Mean Average Precision (mAP): By means of averaging the AP values across all classes, the mAP provides a single metric that represents the overall performance of the model.

This comprehensive methodology and experimental design establish a solid framework for evaluating the proposed barcode recognition system's performance.

The formula [10] [11]:

$$mAP = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} AP_i$$

In which N features the number of classes, and average precision AP_i for each class i. The mean average precision (mAP) metric is frequently reported at various IoU thresholds, as @0.5, that calculates the metric at a singular IoU threshold 0.5, and mAP @0.5:0.95, that averages values of AP over IoU thresholds from 0.5-0.95 in 0.05 increments. This range allows for a more comprehensive assessment of the model's detection performance, capturing both high and low IoU requirements.

Experimental Procedure. In the barcode detection phase, a Nano version of YOLO-v5 was used and trained for 100 epochs. The annotated dataset was divided into training, validation, and testing sets with splits of 70%, 20%, and 10%, respectively, ensuring a balanced evaluation across training and validation phases.

Results and Discussion. The YOLO-v5 model was employed in the proposed system to accurately identify barcodes in a dataset that consists of 3,800 annotated images. The results of this training and testing process are summarized in Table 1.

Table 1

Represents the mAP of YOLO-v5 and the Pyzbar's precision on the proposed dataset

Barcode Dataset size	Barcode Detection with YOLO-v5		Barcode Decoding with Pyzbar
3800	*mAp* @0.5	*mAp* @0.5:0.95	90%
	96%	97%	

This work investigates the performance of the system at two critical stages: detecting and decoding barcodes. According to the table, the YOLO-v5 algorithm demonstrates outstanding ability in detecting barcodes, up to 96% mAP at a threshold IoU of 0.5, with 97% on averages across different IoU thresholds from 0.5 to 0.95. These high mAP scores underline the robust capability of YOLO-v5 in detecting barcode regions correctly in a dataset containing 3,800 images. This really signals reliability in detection accuracy. Later, during further decoding of the barcode, using a library like Pyzbar, achieves an accuracy of 90% with the conversion of the detected barcode data into readable text effectively. Precise detection with YOLO-v5, combined with the high decoding accuracy of Pyzbar, makes it very efficient and reliable for barcode recognition; hence, it is ideal for applications that require precision and speed.

Despite these results, dataset size poses a challenge. Originally containing 1,533 images, the dataset was expanded to 3,800 through data augmentation. To further address this limitation, additional augmentation techniques to diversify the dataset and considering transfer learning to leverage

multiple datasets, potentially enhancing model robustness and generalizability is required.

Fig. 1. Samples of successfull barcode identification with YOLO-v5

Conclusions. This paper underscores the benefits of the integrated mechanism that includes advanced detection and decoding algorithms to enhance the barcode recognition ability. The YOLO-v5 model seems to be showing an mAP value of 96% at IoU of 0.5 and 97% over the interval from 0.5 to 0.95, which assuredly is showing a very high level of precision in identifying the barcode regions out of a sizeable dataset. Meanwhile, the Pyzbar library has coded the output detected with a high decoding accuracy rate of 90% and thus can translate most of the detected barcodes into readable text. The combined system, since it is suitable for both reliable detection and efficient decoding, is appropriate in many applications in which the demand for accuracy and operational speed is of essence. The synergy between the high-precision detection from YOLO-v5 and decoding efficiency in Pyzbar underlines the potentiality of creating reliable barcode recognition solutions, building a very strong foundation for further research and applications.

Bibliography:

1. Ultralytics. "YOLOv5 Documentation". URL: https://docs.ultralytics.com/yolov5

2. Maske, P., Pardhi, K., Hatzade, S., Sharma, R., & Wazalwar, S., "Image Security Barrier (ISB): Hide valuable information in image using machine learning," In Proceedings of the *10th International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology Signal and Information Processing (ICETET-SIP-22)*, 2022: IEEE, pp. 1-6.

3. Kamnardsiri, T., Charoenkwan, P., Malang, C., & Wudhikarn, R., "1D Barcode Detection: Novel Benchmark Datasets and Comprehensive Comparison of Deep Convolutional Neural Network Approaches". *Sensors,* vol. 22, no. 22, p. 8788, 2022. URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/22/22/8788

4. Xiao, Y., & Ming, Z., "1D Barcode Detection via Integrated Deep-Learning and Geometric Approach". *Applied Sciences,* vol. 9, no. 16, p. 3268, 2019. URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/9/16/3268.

5. Luo, Y., & Chen, J., "Two-Dimensional codes recognition algorithm based on Yolov5," *Academic Journal of Computing and Information Science,* vol. 5, no. 7, pp. 68-72, 2022.

6. Zhu, X., "Design of barcode recognition system based on YOLOV5," In *Journal of Physics*: *Conference Series*, 2021, vol. 1995, no. 1: IOP Publishing, p. 012052.

7. Terven, J., Córdova-Esparza, D.-M., & Romero-González, J.-A., "A Comprehensive Review of YOLO Architectures in Computer Vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS," *Machine Learning and Knowledge Extraction,* vol. 5, no. 4, pp. 1680-1716, 2023. URL: https://www.mdpi.com/2504-4990/5/4/83

8. Pyzbar. "Python library for barcodes decoding." URL: https://pypi.org/project/pyzbar

9. OpenCV. "OpenCV: Open Computer Vision Library." URL: https://opencv.org

10. Padilla, R., Netto, S. L., & Da Silva, E. A., " A Survey on Performance Metrics for Object-Detection Algorithms." *Proceedings of the* 2020 *international conference on systems, signals and image processing (IWSSIP)*, 2020: IEEE, pp. 237-242.

11. Zhang, M., & Yin, L., "Solar cell surface defect detection based on improved YOLO v5," *IEEE Access,* vol. 10, pp. 80804-80815, 2022.

Ільчук М.С. НАДІЙНА СИСТЕМА ВИЯВЛЕННЯ ШТРИХ-КОДІВ НА ОСНОВІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Точне та ефективне розпізнавання штрих-кодів має вирішальне значення для багатьох галузей, зокрема логістики, роздрібної торгівлі та охорони здоров'я. Це полегшує автоматизоване відстеження товарів, оптимізує управління запасами, прискорює час транзакцій і підвищує загальну ефективність системи. Нещодавні досягнення в глибокому навчанні помітно підвищили швидкість і точність розпізнавання штрих-кодів, дозволяючи йому йти в ногу зі зростаючими вимогами великомасштабних комерційних і промислових програм.

Ця стаття присвячена розробці та вдосконаленню системи розпізнавання штрих-кодів, яка використовує найсучасніші технології глибокого навчання, зокрема націлена на покращення показників продуктивності, критичних для обробки в режимі реального часу та великих обсягів.

Також у цьому дослідженні вивчається, як сучасні алгоритми виявлення об'єктів та декодування можуть ще більше оптимізувати процес розпізнавання. Для цього була розроблена та представлена система на основі алгоритму YOLO-v5, який забезпечує середню точність (mAP) 96% при пороговому значенні Intersection over Union (IoU) 0,5 та досягає показника 97% у ширшому діапазоні порогів IoU (від 0,5 до 0,95). Було розкрито, що дана модель дає змогу точно визначати регіони штрих-кодів навіть у великих та змішаних наборах даних, що є особливо цінним для систем з великим потоком інформації.

Також з'ясовано, що для подальшої обробки та декодування є доцільним використання бібліотеки Pyzbar, яка демонструє точність 90% у перетворенні виявлених штрих-кодів у читабельний текст. Така інтеграція між YOLO-v5 та Pyzbar дозволяє досягти високої ефективності декодування, що є оптимальним для застосувань, де необхідні швидкість, точність і надійність. У даній статті визначено, що поєднання цих інструментів встановлює новий стандарт як для дослідницьких робіт, так і для реальних практичних застосувань у технологіях розпізнавання штрих-кодів, створюючи надійне та гнучке рішення для автоматизації у сфері логістики, роздрібної торгівлі, охорони здоров'я та інших галузей.

Преставлені у цій статті результати підкреслюють важливість інтеграції передових методів виявлення об'єктів з інструментами декодування для досягнення оптимальних результатів.

Ключові слова: *великі мовні моделі, комп'ютерне бачення, машинне навчання, YOLO-v5, Pyzbar, виявлення штрих-коду.*

УДК 004.8:004.738.5:519.816
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/10

Касерес А.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Глоба Л.С.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ІНТЕГРАЦІЯ ШІ ТА МУЛЬТИАГЕНТНИХ СИСТЕМ ДЛЯ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО АНАЛІЗУ У МУЛЬТИХМАРНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Сучасні вимоги до прийняття рішень у складних системах показують обмеження традиційних систем обробки з використанням багатокритеріального аналізу (MCDA) у динамічних, керованих даними середовищах. Статичні моделі MCDA не можуть масштабуватися та адаптуватися до реальних задач. І це ускладнює їх застосування до завдань інтеграції різноманітних і змінних критеріїв, наприклад, вартості, продуктивності і безпеки.

У цій роботі представлено ШІ-орієнтовану систему, яка включає великі мовні моделі (LLMs) і поєднує їх з мультиагентними системами для вирішення таких задач. Запропонована система автоматизує, масштабує та покращує процес прийняття рішень, динамічно реагуючи на зміни даних і забезпечуючи інтегровану оцінку за кількома критеріями. LLMs забезпечують аналіз вхідних даних, витягуючи складні залежності та вимоги, тоді як спеціалізовані агенти оптимізують ключові параметри. Агенти взаємодіють через централізоване ядро прийняття рішень, створюючи адаптивні рекомендації.

Ключовою інновацією є використання LLM для контекстуального аналізу вхідних даних та динамічних рекомендацій, що долає недоліки традиційних методів MCDA. Запропонована система протестована на прикладі вибору сервісів для оптимізації процесу обробки даних у мульти-хмарному середовищі, де показала покращення ефективності та зниження вартості використання ресурсів.

Співпраця з провідними консалтинговими компаніями у сфері хмарних технологій підтверджує актуальність запропонованого підходу, відкриваючи можливості для подальшого вдосконалення. Хоча система продемонстрована у сфері хмарних обчислень, її модульність дозволяє адаптацію до інших галузей, таких як охорона здоров'я, логістика та фінанси.

Таким чином, дослідження пропонує інноваційну, масштабовану систему, яка долає обмеження традиційних систем на базі MCDA, використовуючи LLM та мультиагентну архітектуру що забезпечує динамічну адаптацію обчислювального процесу до змін вхідних даних та інтегровану оцінку за заданим набором критеріїв. Подальша робота зосереджена на розширенні критеріїв, вдосконаленні взаємодії агентів і тестуванні у різних галузях.

Ключові слова: *багатокритеріальний аналіз рішень, мультиагентні системи, великі мовні моделі, хмарні обчислення, автоматизація прийняття рішень.*

Постановка проблеми. Мульти-хмарні середовища стають ключовим елементом сучасної технологічної інфраструктури, забезпечуючи масштабованість, гнучкість та підвищену продуктивність [1]. За останні роки використання мультихмарних рішень значно зросло, оскільки організації прагнуть уникнути залежності від одного провайдера і оптимізувати свої витрати [2]. Однак це створює нові виклики, пов'язані з інтеграцією сервісів, управлінням ресурсами та забезпеченням безпеки.

Для вирішення складних завдань вибору традиційно використовується такі підходи як багатокритеріальний аналіз (MCDA) [3]. Втім, його застосування у мультихмарних середовищах ускладнюється через динамічний характер цих систем, де дані та критерії змінюються в реальному часі. Зокрема, статичність моделей MCDA не дозволяє оперативно адаптуватися до змін умов, що робить їх малоефективними для вирішення реальних задач оптимізації у даній галузі.

Традиційні MCDA-моделі часто застосовуються для статичних середовищ, де параметри критеріїв не змінюються або змінюються дуже повільно [4]. Однак у мультихмарних системах рішення мають враховувати такі критерії [5]:

– Продуктивність – швидкість і затримки під час виконання завдань.

– Вартість – оптимізація витрат на використання хмарних ресурсів.

– Безпека – забезпечення конфіденційності та цілісності даних.

– Складність впровадження: необхідні витрати часу та зусиль на інтеграцію сервісів.

Значний рівень взаємозалежності між цими критеріями та динамічність умов створюють серйозні обмеження для використання MCDA.

З одного боку, мультихмарні середовища вимагають адаптивних, швидких і масштабованих рішень. З іншого боку, існуючі MCDA-моделі, попри свою точність, не враховують динамічність даних і залежності між критеріями. Отже, виникає необхідність у розробці інноваційного підходу, який би поєднував автоматизацію, адаптивність і можливість роботи з великими обсягами даних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Багатокритеріальний аналіз рішень (MCDA) є фундаментальним інструментом для підтримки прийняття рішень у складних системах, де необхідно враховувати множинні, часто конфліктуючі критерії. Традиційні методи MCDA, такі як Аналітичний ієрархічний процес (AHP) та Метод аналізу переваг (TOPSIS), широко застосовуються для оцінки та ранжування альтернатив на основі визначених критеріїв [6]. Однак ці методи мають обмеження у динамічних та та багатовимірних середовищах, оскільки вони зазвичай передбачають статичні моделі та не враховують швидкі зміни вхідних даних.

Мультиагентні системи (MAS) пропонують підхід до моделювання складних систем через взаємодію автономних агентів, кожен з яких має свої цілі та поведінку [7]. Мультиагентна система – набір агентів, кожен із яких відповідає за окремий критерій чи процес. Інтеграція MAS з MCDA дозволяє розподіляти процес прийняття рішень, що підвищує гнучкість та адаптивність системи. Дослідження показують, що використання MAS у поєднанні з MCDA сприяє ефективнішому вирішенню задач, де необхідно враховувати множинні критерії та динамічні зміни середовища [8].

Великі мовні моделі (LLM) – технології на базі штучного інтелекту, що аналізують дані та створюють текстові рекомендації [9]. LLM, такі як GPT-3, демонструють значний потенціал у розумінні та генерації природної мови, що відкриває нові можливості для автоматизації процесів прийняття рішень. LLM можуть аналізувати великі обсяги текстових даних, витягувати релевантну інформацію та надавати рекомендації на основі контексту. Це особливо корисно у середовищах, де дані постійно оновлюються, і необхідно швидко адаптуватися до нових умов. Використання LLM для аналізу текстових даних, таких як новини та звіти, дозволяє агентам у MAS швидко адаптуватися до змін у постачаннях та приймати оптимальні рішення.

Ці приклади демонструють потенціал інтеграції LLM та MAS для розширення можливостей MCDA у різних галузях.

Постановка завдання. У цій роботі пропонується інтеграція мультиагентної AI-системи та великих мовних моделей аналізу контексту (LLM), що дозволяє вирішити зазначені вище проблеми. Основна мета полягає у:

– автоматизації процесу прийняття рішень;

– забезпеченні адаптивності до змінних даних;

– масштабуванні методів до динамічних середовищ.

Виклад основного матеріалу. Для ефективного впровадження багатокритеріального аналізу рішень у мультихмарних середовищах необхідно врахувати специфіку сучасних викликів. Зокрема, традиційні методи MCDA мають обмеження у динамічних, змінних середовищах, де швидко змінюються дані та критерії оптимізації. Серед основних проблем, які потрібно вирішити в рамках цього дослідження:

1. Як автоматизувати процес вибору оптимальних хмарних сервісів, враховуючи складність сучасних мультихмарних середовищ.

2. Як забезпечити динамічність і масштабованість системи у середовищах із постійно змінними параметрами.

3. Як інтегрувати великі мовні моделі для розширення можливостей традиційного MCDA.

4. Як адаптувати мультиагентний підхід для розв’язання задач, пов’язаних із оптимізацією хмарних сервісів.

Очікувані умови передбачають, що система повинна підтримувати адаптацію до змін у вимогах і критеріях, а також забезпечувати інтеграцію інструментів для автоматизованого прийняття рішень.

Для вирішення поставленої задачі пропонується мультиагентна система з інтеграцією великих мовних моделей для вдосконалення багатокритеріального аналізу рішень. Це дозволить забезпечити адаптивність, масштабованість та ефективність системи у динамічних середовищах з великою кількістю змінних критеріїв.

Завдання дослідження:

1. Розробити концептуальну архітектуру мультиагентної системи, що використовує великі мовні моделі для аналізу даних.

2. Розширити класичний підхід MCDA за рахунок інтеграції сучасних алгоритмів штучного інтелекту.

3. Забезпечити автоматизацію оцінки ключових критеріїв, таких як вартість, продуктивність та безпека, шляхом розробки відповідних агентів.

4. Провести тестування системи на реальних сценаріях мультихмарної оптимізації для оцінки її ефективності.

5. Здійснити аналіз зворотного зв'язку між критеріями для динамічної адаптації рекомендацій.

Очікувані результати: запропонований підхід має продемонструвати підвищення точності, швидкості та гнучкості у прийнятті рішень у складних середовищах, таких як мультихмарні системи.

Запропонований підхід базується на мультиагентній архітектурі, де кожен агент відповідає за аналіз конкретного критерію (наприклад, вартість, продук-тивність, безпека) [10]. Велика мовна модель використовується як центральний компонент для обробки текстових запитів, аналізу залежностей та формулювання рекомендацій. Система побудована на принципах модульності, паралельного аналізу даних і інтеграції зворотного зв'язку для уточнення результатів (рисунок 1). Особливу увагу приділено доданню циклу зворотного зв'язку, що дозволяє системі динамічно адаптуватися до змін у вхідних параметрах та взаємозв'язках критеріїв.

Кожен агент у системі відповідає за оцінку одного з ключових критеріїв:

– Агент оптимізації вартості – аналізує ціни на сервіси, отримуючи актуальні дані з баз даних.

– Агент продуктивності – оцінює показники швидкодії та затримки для різних сервісів.

– Агент безпеки – визначає рівень ризиків, пов'язаних із доступом до даних та їх захистом.

– Агент впровадження – оцінює складність інтеграції конкретного сервісу в існуючу інфраструктуру.

Між агентами реалізована синхронна взаємодія через ядро прийняття рішень, яке забезпечує узгодженість результатів та формулювання оптимальної рекомендації. Нововведенням є механізм зворотного зв'язку, який дозволяє агентам переглядати оцінки в разі зміни контексту чи впливу одного критерію на інший.

Великі мовні моделі, зокрема LLAMA 3 [11], використовуються для:

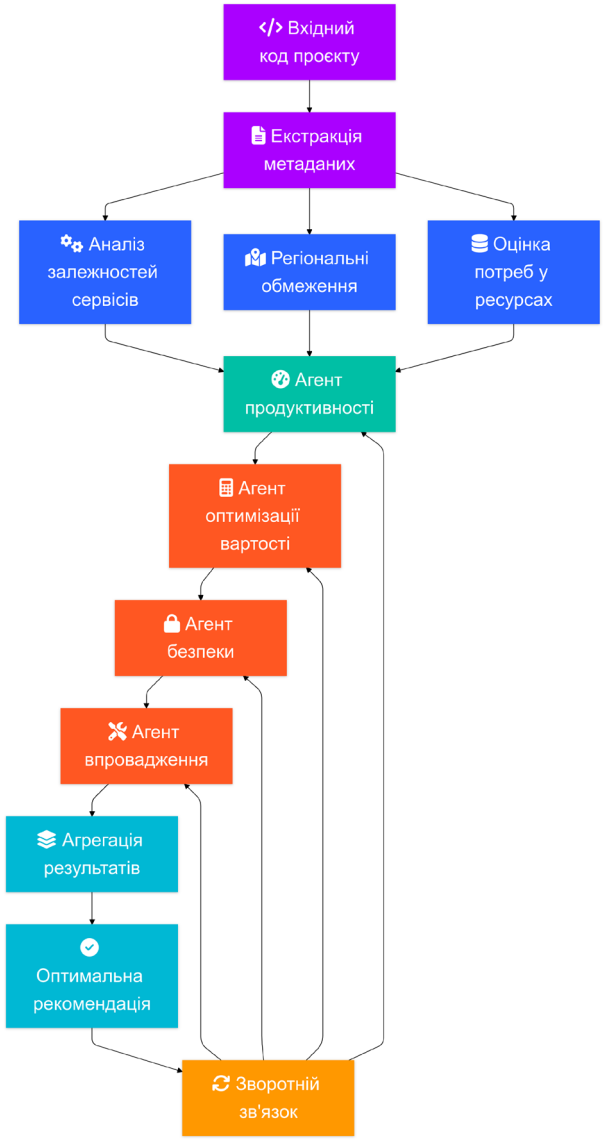


Рис. 1. Архітектура мультиагентної системи

– Розпізнавання залежностей між сервісами у вхідних даних.

– Формування контекстуальних запитів до агентів.

– Генерації текстових пояснень до запропонованих рекомендацій.

Цей підхід дозволяє автоматизувати аналіз вхідних даних, покращити якість оцінки критеріїв і забезпечити взаємодію між компонентами системи. LLM також використовується для обробки даних циклу зворотного зв'язку.

Робота системи включає такі основні етапи:

1. Система отримує запит користувача, що містить опис завдання та початкові обмеження.

2. LLM аналізує текстовий опис і виділяє ключові параметри для подальшого аналізу.

3. Кожен агент виконує аналіз свого критерію, використовуючи відповідні модулі обробки даних.

4. Ядро прийняття рішень об'єднує результати роботи агентів і формує оптимальну рекомендацію.

5. LLM генерує текстовий опис рекомендації, що надається користувачу.

6. Якщо результати виявляють невідповідність або вплив одного критерію на інші, система повторно ініціює аналіз із оновленими параметрами.

Для перевірки функціональності методології було створено прототип системи. У прототипі реалізовано базову взаємодію між агентами, використання LLM для екстракції метаданих та оцінки критеріїв. Також забезпечено автоматичне оновлення даних необхідних для роботи агентів (таких які ціни сервісів, список підтримуваних бібліотек та мов програмування, тощо).

Тестування прототипу на сценаріях оптимізації мультихмарної інфраструктури показало:

– Підвищення точності рекомендацій.

– Зменшення часу на аналіз складних вхідних даних.

– Гнучкість у роботі зі змінними параметрами.

Цей підхід демонструє ефективність та перспективність у контексті динамічних середовищ.

Для реалізації системи було обрано такі технології:

– LangChain – для оркестрації взаємодії між агентами.

– Hugging Face Transformers – для інтеграції та налаштування великих мовних моделей.

– VectorDB – для зберігання контекстуальних даних.

– PostgreSQL – для управління структурованими даними, такими як метадані та параметри системи.

Причини вибору:

1. LangChain [12] забезпечує модульне та масштабоване середовище для побудови мультиагентних систем.

2. Hugging Face [13] надає доступ до потужних попередньо навчених моделей, а також інструменти для їх адаптації до специфічних завдань.

3. VectorDB [14] підтримує швидкий доступ до контекстуально-структурованих даних, що є критично важливим для LLM.

4. PostgreSQL [15] – одна з найбільш популярних реляційних баз даних із широкими можливостями для роботи зі структурованими запитами.

Ці технології відповідають вимогам щодо масштабованості, обробки даних у реальному часі та модульності.

Інтеграція VectorDB у системи із LLM вже продемонструвала успішність у проєктах, пов'язаних із пошуком контекстуальної інформації [16]. Використання реляційних баз даних, таких як

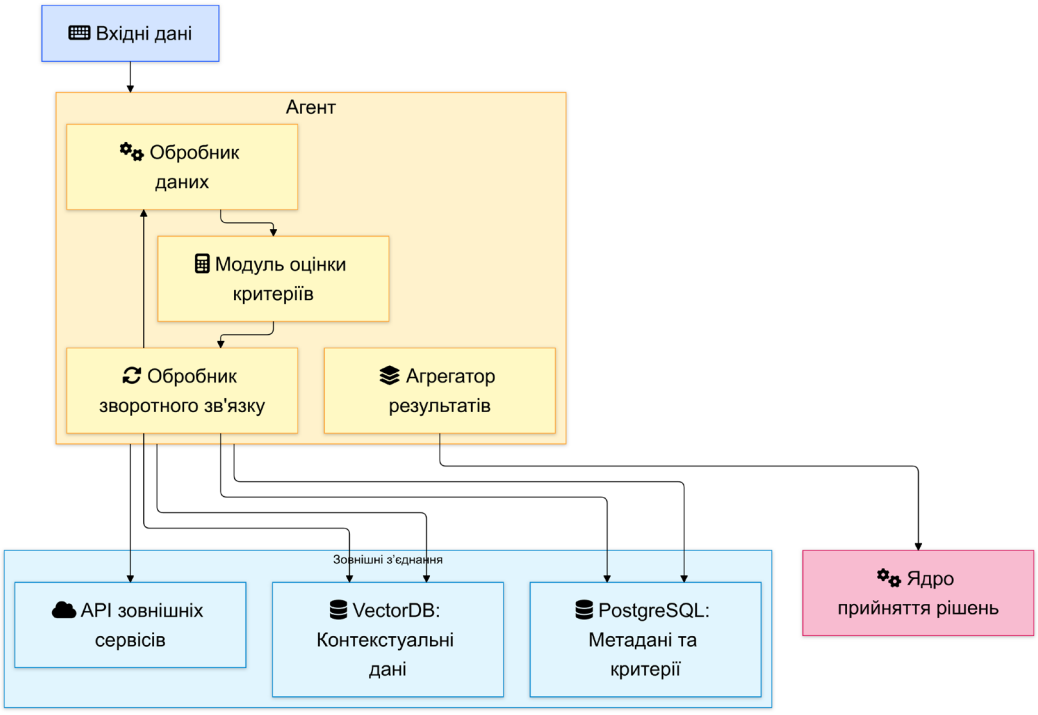


Рис. 2. Уніфікований шаблон для всіх агентів

PostgreSQL, довело свою ефективність у керуванні великими обсягами метаданих [17].

У розробці системи створено уніфікований шаблон для всіх агентів, що забезпечує модульність, масштабованість та підтримку зворотного зв'язку (рисунок 2). Цей шаблон спрощує інтеграцію нових функціональних модулів, оптимізуючи процес їх розробки та тестування.

Особливості шаблону:

1. Шаблон побудовано для підтримки різноманітних критеріїв аналізу. Наприклад, агент оптимізації вартості слугує базовою реалізацією, на основі якої створено інші агенти. Це автоматизує розробку довільних агентів по заданому шаблону.

2. Функціональність, яка виявляється в стандартизованому інтерфейсі для взаємодії з ядром прийняття рішень; інтеграції із PostgreSQL для доступу до структурованих метаданих і параметрів системи; отриманні контекстуальних даних із VectorDB для забезпечення більш точного аналізу критеріїв; взаємодії з API зовнішніх сервісів для отримання додаткових даних у реальному часі.

3. Підтримка зворотного зв'язку здійснюється у вигляді рекомендацій, сформованих агентами, які передаються до ядра прийняття рішень. Ядро аналізує результати роботи і формулює остаточний рейтинг альтернатив.

Серед переваги шаблону можна відзначити:

1. Легку інтеграцію нових агентів або оновлення існуючих.

2. Підтримку одночасної роботи кількох агентів із мінімальним впливом на продуктивність системи.

3. Завдяки зворотному зв'язку агенти здатні швидко адаптуватися до змін у критеріях чи даних.

4. Єдина архітектура полегшує перевірку коректності роботи нових агентів.

Розглянемо формування агенту оцінки на приклад агенту продуктивності, який аналізує такі показники, як затримка виконання та пропускна здатність передачі даних. Агент використовує VectorDB для розпізнавання залежностей між вхідними параметрами та PostgreSQL для збереження ключових фактів аналізу.

Інфраструктура обміну даними підтримує синхронну та асинхронну взаємодію між усіма компонентами системи, включаючи агентів, ядро прийняття рішень, та сховища даних (рисунок 3).

VectorDB використовується всіма агентами та LLM для отримання контекстуальних даних, необхідних для аналізу критеріїв. Наприклад, для аналізу залежностей між сервісами або формування запитів, які враховують раніше оброблену інформацію.

PostgreSQL слугує основним джерелом структурованих даних, таких як метадані (наприклад, специфікації сервісів і обмеження), поточні параметри критеріїв (наприклад, вартість, продуктивність). Кожен агент використовує PostgreSQL для доступу до результатів інших агентів або спільних даних.

Переваги цієї архітектури:

– Швидкий доступ до контекстуальної інформації через VectorDB.

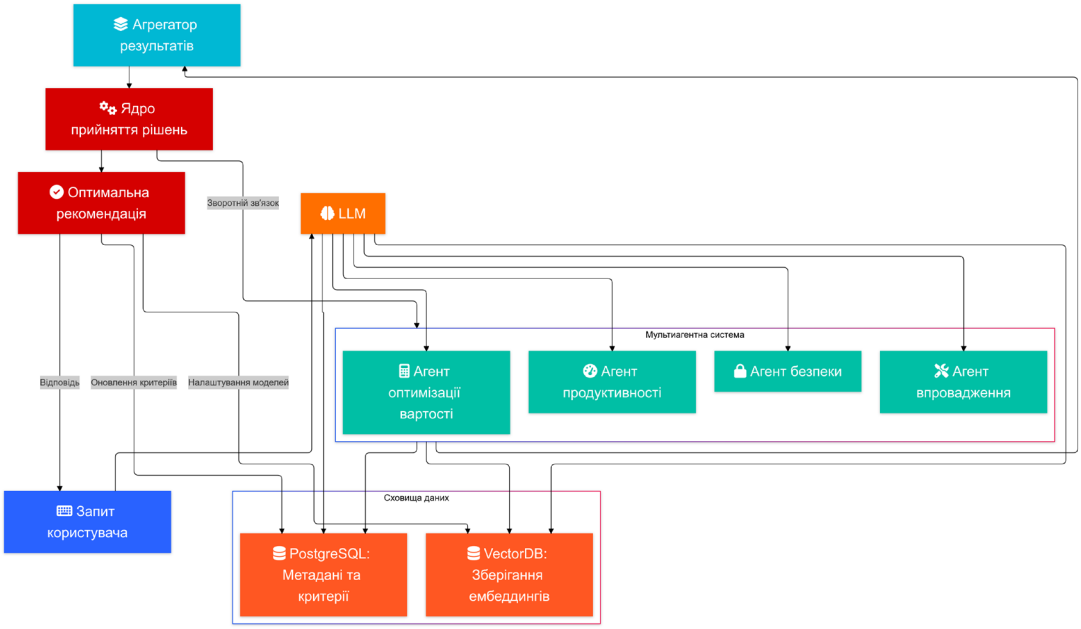


Рис. 3. Інфраструктура обміну даними

– Єдина база метаданих на основі PostgreSQL забезпечує узгодженість даних між агентами.

– Масштабованість: нова логіка агентів може бути додана без суттєвих змін в існуючих процесах.

Ця реалізація дозволяє забезпечити як ефективність, так і масштабованість системи, адаптуючи її до реальних сценаріїв використання.

Система була протестована в сценарії оптимізації мультихмарної інфраструктури. Сценарій передбачав вибір оптимальних хмарних сервісів за критеріями вартості (зменшення загальної вартості послуг), продуктивності (забезпечення низької затримки та високої пропускної здатності), безпеки (відповідність стандартам захисту даних) та складность впровадження (оцінка ресурсів, необхідних для інтеграції).

Процес тестування відбувався у такі етапи:

1. Було змодельовано запит користувача щодо підбору хмарних сервісів для виконання з описом завдань і обмежень.

2. Система отримувала вхідні дані, аналізувала їх за допомогою LLM і формувала запити до агентів.

3. Агентна система оцінювала критерії та повертала оптимальну рекомендацію через ядро прийняття рішень.

Результати демонструють, що запропонована система досягла значних переваг у порівнянні з традиційними підходами із застосуванням методу MCDA. Оцінка проводилася за показниками, які наведені у таблиці 1:

Результати свідчать про значний потенціал запропонованої системи.

Попри численні переваги, запропонована система має ряд обмежень:

1. Використання LLM вимагає значних обчислювальних потужностей, що може впливати на вартість впровадження в масштабних сценаріях.

2. Результати аналізу залежать від точності та повноти вхідних даних, що може бути проблемою в середовищах з недостатньо структурованими даними.

3. Система залежить від якості даних, які отримує з VectorDB і PostgreSQL, що створює окрему зовнішню залежність для коректної роботи.

Висновки. У статті представлено методологію, яка об'єднує потужність великих мовних моделей із модульністю мультиагентної архітектури. Це дозволило автоматизувати процес багатокритеріального аналізу рішень і покращити його адаптивність.

Запропонована система була протестована в контексті мультихмарної оптимізації обчислювальних ресурсів. Результати експериментів показали, що система може знижувати витрати, підвищувати продуктивність і забезпечувати вищу якість прийняття рішень у порівнянні з традиційними підходами на основі MCDA.

Використання модульної архітектури дозволяє легко додавати нові критерії, агенти або сценарії, що відкриває широкі можливості для адаптації системи до різноманітних завдань.

Запропоновану систему позитивно оцінили представники провідних хмарних консалтингових компаній, що підкреслює її актуальність для реального використання.

Основні напрямки подальших досліджень включають:

1. Планується додати нові критерії для аналізу, такі як відмовостійкість і відповідність вимогам фізичного розтушування даних.

2. Оптимізація механізмів зворотного зв'язку між агентами що дозволить забезпечити більш точну оцінку взаємозалежних критеріїв.

3. У співпраці з провідними консалтинговими компаніями буде проведено валідацію системи в реальних бізнес-сценаріях мультихмарної оптимізації.

4. Зниження вимог до обчислювальних ресурсів при використанні LLM стане ключовою задачею для зниження вартості системи.

5. Передбачається адаптація системи до роботи з новими мовними моделями.

Подальша робота дозволить розширити функціональність, покращити ефективність і підготувати систему до більш широкого впровадження.

Таблиця 1

Результат тестування системи

Показник	Результат
Зниження витрат	Система запропонувала оптимальні варіанти розгортання, які зменшили вартість на 15-20% у порівнянні з ручними методами аналізу
Покращення продуктивності	Використання агентів продуктивності дозволило скоротити затримку хмарних сервісів до 12-18 мс, що на 25% швидше за традиційні рішення.
Адаптивність	Впровадження зворотного зв'язку дозволило системі адаптувати критерії до змінних умов у реальному часі.
Автоматизація	Усі кроки процесу були виконані автоматично, зменшуючи втручання користувача та людські помилки.

Список літератури:

1. Saxena D., et al. A Survey and Comparative Study on Multi-Cloud Architectures: Emerging Issues And Challenges For Cloud Federation. *ArXiv*, 2021, abs/2108.12831. URL: https://arxiv.org/abs/2108.12831 (дата звернення: 25.11.2024).
2. Flexera. Flexera 2024 State of the Cloud Report. URL: https://info.flexera.com/CM-REPORT-State-of-the-Cloud (дата звернення: 25.11.2024).
3. Linkov I., Moberg E. Multi-Criteria Decision Analysis: Environmental Applications and Case Studies. 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2012. 204 p.
4. Buriachenko A., Kuts N. Multi-Criterion Analysis Methods. 2021. URL: https://www.researchgate.net/publication/348774582_MULTI-CRITERION_ANALYSIS_METHODS (дата звернення: 26.11.2024).
5. Wang P., et al. Optimizing Data Placement for Cost-Effective and High Available Multi-Cloud Storage. *Computing and Informatics*, 2020, 39, pp. 51–82. DOI: 10.31577/cai20201-251.
6. Hanine M., Boutkhoum O., Tikniouine A., et al. Application of an Integrated Multi-Criteria Decision Making AHP-TOPSIS Methodology for ETL Software Selection. *SpringerPlus*, 2016, 5, p. 263. DOI: https://doi.org/10.1186/s40064-016-1888-z (дата звернення: 26.11.2024).
7. Dorri A., Kanhere, S. S., Jurdak R. Multi-Agent Systems: A Survey. *IEEE Access*, 2018, 6, pp. 28573–28593. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2831228.
8. Boutkhoum O., Hanine M., Agouti, T., Tikniouine, A. Multi-Agent Based Modeling Using Multi-Criteria Decision Analysis and OLAP System for Decision Support Problems. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2015, 9, pp. 2243–2250.
9. Cloudflare. What is a Large Language Model (LLM)? URL: https://www.cloudflare.com/learning/ai/what-is-large-language-model/ (дата звернення: 26.11.2024).
10. Li, Y., Tan, C. A Survey of the Consensus for Multi-Agent Systems. Systems Science & Control Engineering, 2019, 7(1), pp. 468–482. DOI: https://doi.org/10.1080/21642583.2019.1695689 (дата звернення: 24.11.2024).
11. The Llama 3 Herd of Models. Llama Team, AI @ Meta. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.21783 (дата звернення: 24.11.2024).
12. IBM. What is LangChain? URL: https://www.ibm.com/topics/langchain.
13. Lutkevich, B. What is Hugging Face? URL: https://www.techtarget.com/whatis/definition/Hugging-Face#:~:text=Hugging%20Face%20lets%20users%20create,advance%20the%20field%20of%20NLP (дата звернення: 26.11.2024).
14. VectorDB Documentation. URL: https://vectordb.com/ (дата звернення: 26.11.2024).
15. PostgreSQL. PostgreSQL: The World's Most Advanced Open Source Relational Database. URL: https://www.postgresql.org/ (дата звернення: 25.11.2024).
16. Smith, J., Brown, K. Contextual Information Retrieval Using Vector Databases. *Journal of AI Research*, 2023.
17. Johnson, R., Patel, V. Efficient Data Storage Solutions in Multi-Agent Systems. *Database Systems Review*, 2022.

Caceres A., Globa L.S. INTEGRATION OF AI AND MULTI-AGENT SYSTEMS FOR MULTI-CRITERIA DECISION ANALYSIS IN MULTI-CLOUD ENVIRONMENTS

Modern decision-making requirements in complex systems show the limitations of traditional multicriteria decision analysis (MCDA) in dynamic, data-driven environments. Static MCDA models cannot scale and adapt to real-world problems. Moreover, applying them to problems of integrating diverse and variable criteria, such as cost, performance, and safety, makes it difficult.

This paper presents an AI-based system that incorporates large language models (LLMs) and combines them with multi-agent systems to solve such problems. The proposed system automates, scales, and improves decision-making by dynamically responding to data changes and providing an integrated assessment across multiple criteria. LLMs provide input data analysis, extracting complex dependencies and requirements, while specialized agents optimize vital parameters. Agents interact through a centralized decision-making core to create adaptive recommendations.

The key innovation is using LLM for contextual analysis of input data and dynamic recommendations, eliminating gaps in traditional MCDA models. The proposed framework has been tested in cloud computing optimization, which has improved efficiency, accuracy, and usability. For example, the cost optimization agent calculates resource consumption, while the performance agent estimates latency and throughput. This collaborative approach has proven to be effective in real-world conditions.

Cooperation with leading cloud consulting companies confirms the relevance of this framework, offering opportunities for further improvement. The modularity and adaptability of the framework demonstrated in cloud systems make it applicable in other areas, such as healthcare, logistics, and finance.

In conclusion, this research presents a novel, scalable framework that overcomes the limitations of traditional MCDA by leveraging LLM and multi-agent systems. Ongoing work is focused on extending the criteria, improving agent interactions, and testing in various industries to ensure practical impact and applicability.

Key words: *multi-criteria decision analysis, multi-agent systems, large language models, cloud computing, decision-making automation.*

УДК 004.4, 004.89, 004.032.26
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/11

Кириченко Є.О.
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

Кириченко О.Л.
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

ПОБУДОВА МОДЕЛЕЙ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ У ХМАРНОМУ СЕРЕДОВИЩІ ЗАСОБАМИ AWS EMR

Стаття присвячена детальному аналізу можливостей використання хмарної технології AWS EMR (Amazon Web Services Elastic MapReduce) для побудови моделей нейронних мереж. У статті розкрито особливості розгортання моделей машинного навчання, а також визначено підходи до вибору відповідної інфраструктури, що безпосередньо впливає на продуктивність, масштабованість та економічну ефективність розроблених рішень. Розкрито специфіку навчання моделей нейронних мереж на великих масивах даних та здійснено порівняльний аналіз рішень для розгортання нейронних мереж на основі стохастичних моделей за допомогою хмарних сервісів Amazon EMR Serverless. З'ясовано, що нейронну мережу, розроблену на основі стохастичної моделі для передбачення флуктуацій цін на ринку акцій, можна ефективно інтегрувати у веб-додаток, який може бути легко розгорнутий в хмарному середовищі. Навчання моделі здійснювалося на даних, отриманих з Google Finance. Здійснено оцінку якості побудованої моделі та ефективності передбачення на основі середньоквадратичної помилки (RMSE). Встановлено, що вартість використання ресурсів для цієї моделі в середовищі Amazon EMR Serverless склала 0.018$, що є економічно вигіднішим порівняно з аналогічною конфігурацією на Amazon EMR на EC2, яка коштує приблизно 0.058$ (економія становить 31%). Зроблено висновки щодо основних переваг та недоліків Amazon EMR Serverless у застосуванні для обробки великих даних у задачах машинного навчання. Наукова новизна роботи полягає у розробці стратегій впровадження моделей нейронних мереж у хмарному середовищі за допомогою AWS EMR. Висновки свідчать про ефективність використання хмарних технологій для підвищення продуктивності та масштабованості моделей машинного навчання, а також про актуальність вибору компонентів AWS для таких рішень у майбутньому.

Ключові слова: *хмарні обчислення, аналітичні дослідження, хмара, хмарні технології, безсерверна архітектура, AWS EMR (Amazon Web Services Elastic MapReduce), моделі машинного навчання, нейронні мережі, Байєсівська нейронна мережа, розподілені обчислення, великі дані (Big Data).*

Постановка проблеми. В останні роки штучний інтелект (ШІ) і, зокрема, нейронні мережі стали невід'ємною частиною багатьох сфер життя та бізнесу. Вони використовуються для розпізнавання образів, обробки природної мови, передбачення трендів, аналізу поведінки клієнтів та багато іншого. Одним з ключових факторів, що сприяють швидкому розвитку цих технологій, є використання хмарних обчислень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Хмарні обчислення дозволяють динамічно масштабувати обчислювальні ресурси відповідно до потреб. Це особливо важливо при тренуванні великих моделей нейронних мереж, які потребують значних обчислювальних потужностей. Хмарні платформи надають доступ до сучасного апаратного забезпечення, такого як GPU та TPU, що значно прискорює процес тренування моделей. Це дозволяє суттєво зменшити час, необхідний для отримання результатів [1].

У сучасному динамічному технологічному ландшафті вибір інструментів для розгортання моделей машинного навчання є важливим рішенням, яке може суттєво вплинути на успіх проєктів. Обрання між різними підходами стає все більш складним завданням, оскільки розробники та спеціалісти з обробки даних прагнуть задовольнити специфічні вимоги проєктів. Вибір відповідної інфраструктури безпосередньо впливає на продуктивність, масштабованість та економічну ефективність програм машинного навчання. Завдяки всебічному аналізу розробники можуть узгодити свій вибір із унікальними потребами своїх проєктів, що в кінцевому підсумку оптимізує процес розгортання. Це особливо актуально у сфері машинного навчання, де відмінності в інфраструктурі, інструментах і підтримці спеціалізованих алгоритмів можуть суттєво вплинути на результати [2].

Одним з головних критеріїв при виборі хмарних технологій для моделей нейронних мереж є обсяг даних з якими потрібно працювати. Великі дані вимагають значних обчислювальних ресурсів для зберігання та обробки. Традиційні системи зберігання даних часто не можуть забезпечити необхідну швидкість доступу та обробки даних. Ефективне масштабування обчислювальних ресурсів для тренування нейронних мереж є серйозним викликом, що потребує паралельного обчислення та розподілу навантаження між багатьма процесорами або графічними процесорами (GPU) [3]. Навчання моделей нейронних мереж на великих даних може займати значний час, що вимагає оптимізації процесу навчання та використання ефективних алгоритмів [4].

Постановка завдання. ***Метою дослідження*** є вивчення можливостей та переваг використання AWS EMR для побудови та тренування моделей нейронних мереж у хмарному середовищі.

Об'єкт дослідження: процес розгортання моделей нейронних мереж у хмарному середовищі.

Предмет дослідження: використання технології AWS EMR для розробки ефективних методів розподіленого обчислення, що дозволять значно прискорити процес навчання моделей та покращити їх продуктивність.

Виклад основного матеріалу. У даній статті проведемо порівняльний аналіз рішень для створення і розгортання нейронних мереж на основі стохастичних моделей за допомогою хмарних сервісів.

Розглянемо нейро-мережу на основі стохастичної моделі для вирішення задачі передбачення флуктуацій цін на ринку акцій. Архітектура розробленого додатку (рис. 1) складається з веб-серверу Flask, що обробляє запити від клієнтів, взаємодіє з кластером EMR для отримання передбачень та повертає результати клієнту; кластеру Amazon EMR, який зберігає побудовану модель нейронної мережі, обробляє великі обсяги даних та забезпечує масштабованість; та сховища Amazon S3 для збереження побудованої моделі нейронної мережі та інших (вхідних, вихідних) даних.

Де Amazon EMR (Elastic MapReduce) – це керована платформа для обробки великих даних, яка дозволяє швидко та економічно обробляти і аналізувати великі обсяги даних використовуючи різноманітні фреймворки з відкритим кодом, такі як Apache Spark, Apache Hive і Presto [5].

Amazon EMR призначений для зниження витрат при обробці великих обсягів даних та пропонує численні переваги, включаючи масштабованість, високу продуктивність, економічність з оплатою лише за використані ресурси, інтеграцію з іншими сервісами AWS для легкого обміну даними, простоту налаштування та управління кластером, високу безпеку з можливістю шифрування даних, автоматизацію та управління завданнями через Step Functions і Data Pipelines, а також підтримку широкого спектру аналітичних інструментів, таких як Apache Hive, Pig, HBase та Presto [6].

Ще однією опцією є можливість використання Amazon EMR Serverless, що дозволяє запускати додатки для обробки великих даних без необхідності керування кластерами (рис. 2) [7].

Сервіс допомагає уникнути надмірного або недостатнього виділення ресурсів для завдань обробки даних. Він автоматично визначає ресурси, які потрібні програмі, отримує ці ресурси для обробки завдань і звільняє ресурси, коли завдання завершуються [8].

Побудова моделі нейронної мережі на Amazon EMR Serverless починається з підготовки даних (рис. 3). Цей етап включає збір даних, необхідних для навчання нейронної мережі, та їх збереження у Amazon S3. Потім виконується попередня обробка даних, що включає очищення, нормалі-

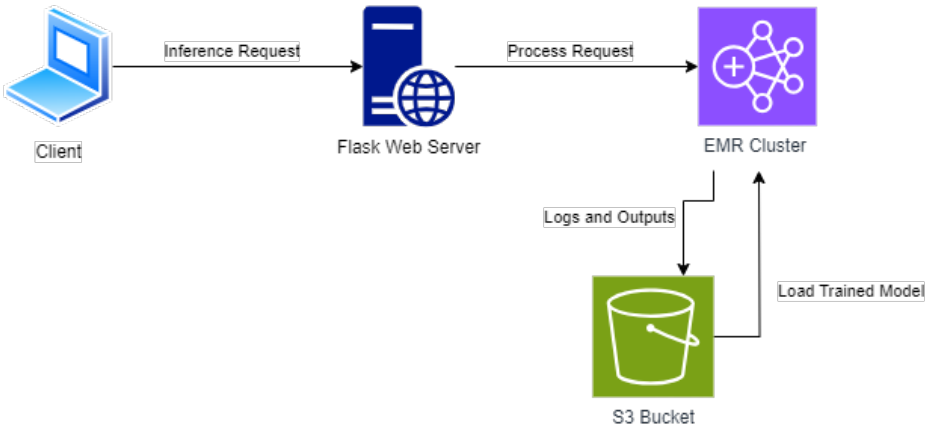


Рис. 1. Додатку для передбачення флуктуацій цін на ринку акцій

зацію та трансформацію даних для забезпечення їхньої готовності до навчання.

Наступним кроком є конфігурація Amazon S3 для завантаження оброблених даних у бакет, звідки вони будуть доступні для подальшої обробки в Amazon EMR Serverless. Після цього створюється кластер EMR Serverless, де налаштовуються необхідні фреймворки та версії програмного забезпечення.

Після налаштування кластеру розробляються Python або Scala скрипти для обробки даних та навчання моделі нейронної мережі. Ці скрипти зберігаються у бакеті S3 для подальшого використання кластером EMR. Далі виконується запуск кластеру, на якому обробляються дані та запускаються задачі.

Під час навчання моделі нейронної мережі здійснюється обчислювальний процес навчання на підготовлених даних. Після навчання моделі її зберігають у S3 для подальшого використання. Потім проводиться оцінка точності моделі на тестових даних, після чого, за необхідності, проводиться оптимізація та повторне навчання для покращення результатів.

Після завершення навчання модель розгортається для використання у реальних сценаріях [9].

Для навчання моделі використовувались дані, отримані з Google Finance [10]. Цей сервіс дозволяє отримати широкий спектр фінансової інформації за вказаними фільтрами, включаючи в себе історичні дані про ціни акцій, об'єми торгів, фінансові звіти, та інші показники. Структура завантаженого файлу з Google Finance наведена в таблиці 1.

Таблиця 1

Структура завантаженого файлу з Google Finance з цінами акцій

Назва поля	Опис
Відкриття (Open)	ціна акції на початку торгового дня
Максимум (High)	найвища ціна, за якою торгувалась акція протягом дня
Мінімум (Low)	найнижча ціна, за якою торгувалась акція протягом дня
Закриття (Close)	ціна акції на момент закриття торгів
Кориговане закриття (Adjusted Close)	ціна закриття, скоригована на корпоративні дії, такі як дивіденди
Обсяг торгів (Volume)	загальна кількість акцій, якими торгували протягом дня.

Також є можливість вибору для яких саме часових інтервалів необхідно отримати дані. Для тренування нашої нейронної мережі використову-

Рис. 2. Принципи роботи Amazon EMR Serverless

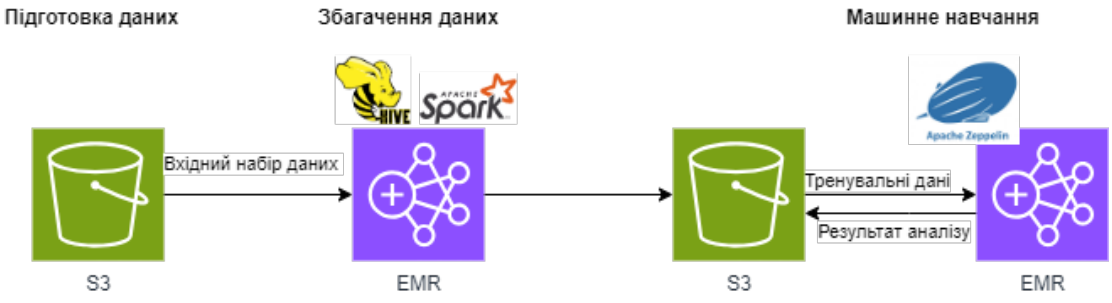


Рис. 3. Процес побудови моделі нейронної мережі на Amazon EMR Serverless

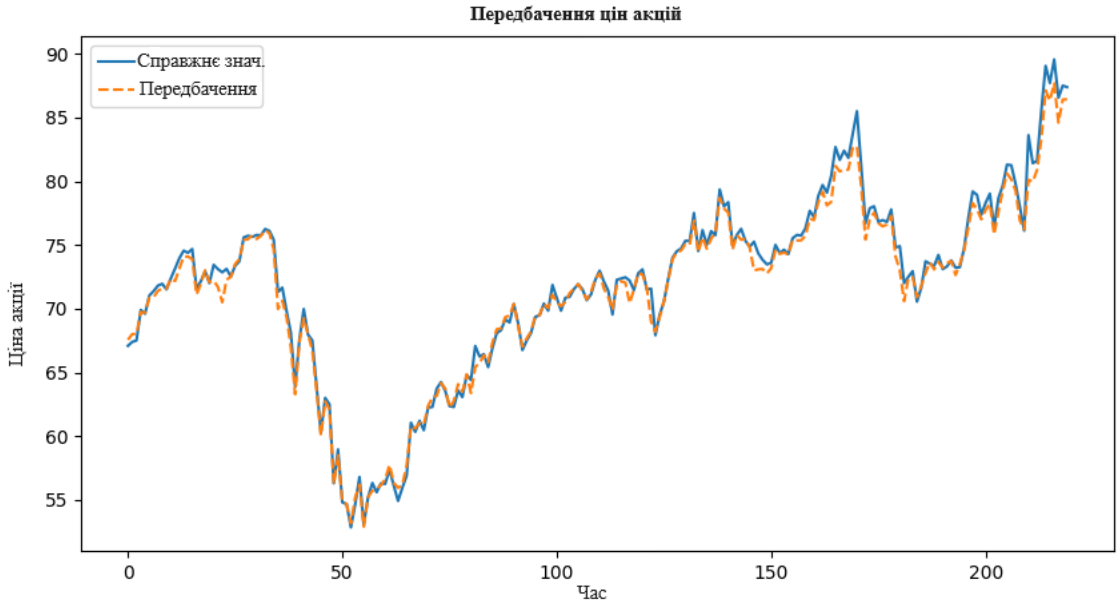


Рис. 4. Прогнозування цін акцій

валися дані за день, що дозволяє отримати більш точні прогнози та детально аналізувати короткострокові тенденції [11].

В якості моделі було обрано Байєсівську нейронну мережу, яка забезпечує імовірнісну реалізацію стандартної нейронної мережі з тією ключовою відмінністю, що ваги та зміщення представлені через апостеріорні розподіли ймовірностей, а не одноточкові оцінки.

Після імпорту даних першим кроком є попередня обробка. Це включає в собі такі завдання як обробка відсутніх значень і стандартизація функцій за допомогою методів, таких як масштабування. Наприклад, перетворення даних у формат, сумісний з алгоритмами машинного навчання, вимагає їх перетворення у Pandas DataFrames [12]. Ця операція є критичною для подальших етапів моделювання.

Для навчання моделі, що передбачатиме майбутні ціни акцій, важливо ретельно розділити набір даних. У випадку часових рядів це вимагає особливого підходу. Зазвичай дані розбиваються на навчальні та тестові підмножини, дотримуючись хронологічного порядку, що дозволяє моделі вивчати минулі тенденції та закономірності.

Для нашої моделі перші 80% даних використовуються для навчання, а решта – для тестування. Такий розподіл дозволяє ефективно оцінювати точність моделі, забезпечуючи достатню кількість даних для навчання та незалежну перевірку її ефективності [13].

На рисунку 4 показано результати роботи моделі на тестових даних.

Ефективність передбачення вимірюється середньоквадратичною помилкою (RMSE), наведеною нижче.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(y_i - \hat{y}_i)^2},$$

де y_i – фактичне значення, $\hat{y}_i$ – прогнозоване значення, а N – кількість точок даних для одного горизонту прогнозування (кроку). Ми використовуємо RMSE, оскільки це один із ключових показників продуктивності для прогнозування часових рядів.

Середньоквадратична помилка (RMSE) зі значенням близьким до нуля вказує на якість моделі [14]. Для побудованої моделі RMSE дорівнює 0.610548001.

Важливим аспектом при побудові моделі є вартість використаних ресурсів у хмарному середовищі. У випадку Amazon EMR Serverless користувач сплачує за кількість віртуального процесора, пам'яті та ресурсів зберігання, які споживає програмне забезпечення, причому плата нараховується за фактично використані ресурси [15]. Для побудованої моделі вартість використаних ресурсів становить 0.018$, аналогічна конфігурація Amazon EMR на EC2 коштуватиме приблизно 0.058$, тобто економія становить 31%.

Висновки. Аналіз результатів побудованої моделі свідчить про те, що Amazon EMR Serverless є ідеальним вибором при обробці великих даних у хмарному середовищі. Оскільки даних генерується та збирається все більше і більше, тому для аналізу даних потрібні високопродуктивні, масштабовані та гнучкі інструменти для надання інформації в режимі реального часу. Amazon EMR Serverless є економічно ефективним, легко конфігурується, дозволяє використовувати інструменти з відкритим кодом (Hive, Pig, Spark тощо) та централізовано зберігати на AWS S3. З іншого боку Amazon EMR Serverless створено для масової пара-

лельної обробки даних, тому не варто використовувати цей інструмент, якщо набір даних достатньо малий і легко обробляється на одній машині.

Таким чином поєднання нейронних мереж з хмарними обчисленнями, такими як AWS EMR, відкриває нові можливості для науковців та розробників, забезпечуючи ефективність, масштабованість та доступ до потужних обчислювальних ресурсів, необхідних для реалізації складних проектів у галузі штучного інтелекту.

Список літератури:

1. Aach M., Inanc E., Sarma R. et al. Large scale performance analysis of distributed deep learning frameworks for convolutional neural networks. *Journal of Big Data*, 2023. 10(1). 96(2023).

2. Rajendran P., Maloo S., Mitra R., Chanchal A., Aburukba R. Comparison of Cloud-Computing Providers for Deployment of Object-Detection Deep Learning Models. *Applied Sciences,* 2023. 13. 12577.

3. Wu X., Zhu X., Wu G.-Q., & Ding W. Data mining with big data. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering,* 2014. 26(1). P. 97-107.

4. Li D., Zhang Q., & Zheng D. Parallel computing frameworks for big data. *IEEE Cloud Computing,* 2017. 4(1). P. 24-33.

5. Amazon EMR: Easily run and scale Apache Spark, Hive, Presto, and other big data workloads. URL: https://aws.amazon.com/emr/?nc=sn&loc=0 (дата звернення 14.10.2024)

6. Shiyani P. Big Data Analytics Adoption in Cloud (Amazon EMR). 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/347506371_Big_Data_Analytics_Adoption_in_Cloud_Amazon_EMR (дата звернення 15.10.2024)

7. R. A. P. Rajan. Serverless architecture-a revolution in cloud computing. *2018 Tenth International Conference on Advanced Computing (ICoAC)*, Chennai, India, 2018. Pp. 88–93. DOI: 10.1109/ICoAC44903.2018.8939081

8. What is Amazon EMR Serverless? URL: https://docs.aws.amazon.com/emr/latest/EMR-Serverless-UserGuide/emr-serverless.html (дата звернення 17.10.2024)

9. Nandan Umarji. Databricks to Amazon EMR: Build Serverless Enterprise Data Science Platform on AWS. 2024. URL: https://mactores.com/blog/databricks-to-amazon-emr-build-serverless-enterprise-data-science-platform-on-aws (дата звернення 15.10.2024)

10. Stocks API Documentation. URL: https://polygon.io/docs/stocks/getting-started (дата звернення 17.10.2024)

11. Dwiandiyanta B.Y., Hartanto R. and Ferdiana R. Deep Learning in Stock Market Prediction: A Five-Year Literature Review on Developments, Challenges, and Future Directions. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2023. 101(21). DOI: 10.3844/jcssp.2022.350.358

12. Rebecca Vickery. Introduction to Pandas DataFrames: Processing, cleaning and selecting data using pandas. URL: https://towardsdatascience.com/introduction-to-pandas-dataframes-b1b61d2cec35 (дата звернення 17.10.2024)

13. Chandra Rohitash, He Yixuan. Bayesian neural networks for stock price forecasting before and during COVID-19 pandemic. *PLOS ONE*, 2021. 16(7): e0253217. URL: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253217 (дата звернення 20.10.2024)

14. Noel, D. Stock Price Prediction using Dynamic Neural Networks, 2023. URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.12969 (дата звернення 20.10.2024)

15. Amazon EMR pricing. URL: https://aws.amazon.com/emr/pricing/ (дата звернення 17.10.2024)

Kyrychenko Ye.O., Kyrychenko O.L. BUILDING NEURAL NETWORK MODELS IN A CLOUD BY MEANS OF AWS EMR

The article presents a detailed analysis of the potential of AWS EMR (Amazon Web Services Elastic MapReduce) cloud technology for building neural network models. It examines the specifics of deploying machine learning models and identifies approaches for selecting the appropriate infrastructure that directly impacts the performance, scalability, and cost-effectiveness of developed solutions. The paper explores the specifics of training neural network models on large datasets and provides a comparative analysis of deployment solutions for neural networks based on stochastic models using Amazon EMR Serverless cloud services. The study finds that a neural network developed on a stochastic model for predicting stock market price fluctuations can be effectively integrated into a web application, easily deployable in a cloud environment. The model training was conducted on data sourced from Google Finance, with model quality and prediction efficiency evaluated using the Root Mean Square Error (RMSE). It was determined that the resource usage cost for this model on Amazon EMR Serverless was $0.018, which is more economically favorable compared to a similar configuration on Amazon EMR on EC2, which costs around $0.058 (resulting in a 31% savings). Conclusions were drawn regarding the primary advantages and disadvantages of Amazon EMR Serverless for big data processing in machine learning tasks. The scientific novelty of this work lies in the development of strategies for deploying neural network models in the cloud using AWS EMR. The conclusions highlight the efficiency of cloud technologies for enhancing the performance and scalability of machine learning models, as well as the relevance of selecting AWS components for such solutions in the future.

Key words: *cloud computing, analytical research, cloud, cloud technologies, serverless architecture, AWS EMR (Amazon Web Services Elastic MapReduce), machine learning models, neural networks, Bayesian neural network, distributed computing, Big Data.*

УДК 004.78
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/12

Козуб В.В.
Державний університет «Київський авіаційний інститут»

ПРАКТИКА ВИКОРИСТАННЯ НОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ В МІКРОСЕРВІСНІЙ АРХІТЕКТУРІ ПОБУДОВИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

У статті здійснено аналіз новітніх технологій мікросервісної архітектури, яка вже давно є ключовою концепцією в розробці гнучких, масштабованих та надійних програмних систем. Мікросервісний підхід дозволяє розбивати додатки на незалежні компоненти, що взаємодіють через чітко визначені інтерфейси, що забезпечує модульність і масштабованість. Методи дослідження включають огляд літератури, аналіз існуючих технологій і підходів у сфері мікросервісів, а також огляд прикладів застосування новітніх інструментів для вирішення проблем, що виникають при інтеграції, масштабуванні та безпеці. Зокрема, акцентовано на нових інструментах автоматизації процесів розгортання та тестування, технологіях для забезпечення спостережуваності, методах оптимізації продуктивності, а також інтеграції штучного інтелекту для прогнозування навантажень і автоматизованого масштабування. Основні результати дослідження включають структуризацію основних напрямів, в яких відбувається вдосконалення мікросервісної архітектури, зокрема: автоматизація пайплайнів для тестування й розгортання, використання технологій для кешування та прискорення доступу до даних, інтеграція OpenTelemetry і Prometheus для моніторингу, а також інтеграція AI для аналізу і прогнозування навантажень. Також виявлено значення гібридних архітектур, які дозволяють поступово інтегрувати нові технології без порушення роботи існуючих систем. Наукова новизна роботи полягає в комплексному аналізі новітніх технологій та їхнього впливу на ефективність мікросервісної архітектури, а також у виявленні перспективних напрямків для подальших досліджень, спрямованих на подолання існуючих проблем в інтеграції, безпеці та масштабуванні. Важливим внеском є також вивчення впливу штучного інтелекту та автоматизації на покращення ефективності управління мікросервісами. У висновках зазначено, що для подальшого вдосконалення мікросервісної архітектури необхідно активніше інтегрувати новітні інструменти автоматизації, машинного навчання і штучного інтелекту, що дозволяють забезпечити ефективне управління ресурсами, зниження затримок та поліпшення безпеки. Подальші дослідження повинні орієнтуватися на розв'язання питань інтеграції старих і нових систем, а також на вдосконалення процесів оркестрації та спостережуваності.

Ключові слова: *архітектура мікросервісів, різноманітніття розгортання, балансування навантаження, стійкість системи, оптимізація ресурсів.*

Постановка проблеми. Мікросервісна архітектура вже тривалий час є ключовою концепцією у розробці програмного забезпечення, що дозволяє будувати гнучкі, масштабовані та стійкі системи. Мікросервісна архітектура – це підхід до побудови програмного забезпечення, у якому додаток розбивається на невеликі незалежні компоненти (мікросервіси). Кожен мікросервіс виконує певну функцію та може працювати автономно, використовуючи чітко визначені інтерфейси для взаємодії з іншими компонентами. Цей підхід відрізняється від монолітної архітектури, де вся функціональність інтегрована в єдину кодову базу.

При використанні мікросервісної архітектури забезпечується модульність, незалежність розгортання та спрощення обслуговування ПЗ, що робить її незамінною для сучасних хмарних платформ, мобільних додатків, фінтех-рішень та промислових IoT-систем [1, с. 16638; 2, с. 196]. Але разом з перевагами мікросервісам притаманні численні недоліки, вирішення яких є викликом для фахівців при побудові нових систем:

1) складність інтеграції, яка обумовлена необхідністю використання складної інфраструктури для управління взаємодією між десятками (сотнями) мікросервісів (API Gateway, Service Mesh) і вимогами до забезпечення безперервного з'єднання та обробки запитів у системах [3];

2) питання продуктивності і затримок, які є основним і постійним недоліком у роботі мікросервісів [4];

3) потреба у динамічному масштабуванні для підтримки продуктивності без перевитрат ресурсів;

4) питання моніторингу і безпеки є особливо складною задачею через необхідність аналізу великої кількості метрик, логів і трасування запитів.

Хоча сучасні дослідження демонструють значний прогрес у вдосконаленні архітектури мікросервісів, акцентуючи увагу на інтеграції нових інструментів, підходів і технологій, але носять розрізнену структуру і вирішують задачі окремих проблематик. Тому дане дослідження не тільки не втратило актуальності в останні роки, а й зросло, через те, що компанії активно переходять до мікросервісної архітектури, і змушені самотужки шукати рішення для мінімізації негативного ефекту від недоліків використання мікросервісної архутектури. Особливу роль відіграють концепції оркестрації, спостережуваності (observability), безпеки, автоматизації процесів, а також використання штучного інтелекту для підвищення ефективності управління мікросервісами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Мікросервісна архітектура залишається фундаментальним підходом у побудові розподілених систем, і аналіз сучасних досліджень підкреслює кілька основних напрямків її розвитку. Зокрема, в центрі уваги перебувають автоматизація, оптимізація продуктивності, забезпечення спостережуваності, інтеграція штучного інтелекту, а також гібридні архітектури, що поєднують моноліти з мікросервісами.

Автоматизація є ключовою для стабільності та ефективності мікросервісів, і ця тема докладно розглядається у дослідженнях Браветі [5, с. 352], Фу [6, с. 416], Мустяла [7, с. 61], Муґерая і Девадкар [8, с. 2]. Ці роботи аналізують алгоритми динамічного розгортання та управління ресурсами, підкреслюючи роль Kubernetes у реалізації автоматизованого масштабування залежно від навантаження. Зокрема, в цих дослідженнях пропонують оптимальні стратегії автоматизації для зменшення витрат на інфраструктуру, тоді як деякі оцінюють продуктивність схем управління контейнерами на різних хмарних платформах, демонструючи, як адаптивні алгоритми підвищують ефективність навіть у середовищах із піковими навантаженнями. Мустяла фокусується на оптимізації розподілу завдань у Kubernetes, досліджуючи, як поєднання динамічного планування завдань і алгоритмів машинного навчання дозволяє досягати балансу між вартістю та продуктивністю.

Продуктивність і масштабованість розглядаються як основні виклики в сучасних мікросервісах. Гонзалес [9] і Ганг [10, с. 3] зосереджуються на модульному дизайні систем, що забезпечує стійкість до збоїв і підтримуваність навіть у великих масштабах. Один з них аналізує стратегічні підходи до побудови модульних архітектур, які дозволяють підвищити продуктивність завдяки оптимізації внутрішньої взаємодії сервісів. У свою чергу другий пропонує механізм забезпечення стійкості мікросервісів через різноманітність конфігурацій, що дозволяє зменшити вплив відмов та покращити безпеку.

Спостережуваність є важливим напрямком, і ця тема висвітлюється в роботах Себастьян [11, с. 3], Бельхірі [12, с. 27], Усман [13, с. 86906]. Себастьян [11, с. 4] підкреслює, як інструменти спостережуваності, такі як OpenTelemetry і Jaeger, дозволяють покращити кібербезпеку та операційну стійкість критичних систем. Водночас інші роботи акцентують увагу на важливості трасування та логування для виявлення вузьких місць у мікросервісах, пропонуючи адаптивні підходи до моніторингу залежно від поточного навантаження.

Інтеграція штучного інтелекту для підвищення ефективності мікросервісів є ще однією важливою тенденцією, яку розглядають у дослідженнях [12, с. 28; 13, с. 86908]. Ці дослідження демонструють використання AI для прогнозування навантажень і автоматизації управління ресурсами, що дозволяє адаптувати системи до змін у режимі реального часу. Наприклад, вивчаючи алгоритми динамічного розподілу завдань у хмарних середовищах, підкреслюють, що використання AI підвищує як продуктивність, так і стабільність систем.

Гібридні архітектури, що поєднують моноліти з мікросервісами, є ефективним способом поступової модернізації старих систем, і це розглядається в роботах [14, с. 72; 15], а саме побудови API Gateway для інтеграції старих і нових компонентів, тоді як Hang et al. фокусуються на розгортанні стійких архітектур, що поєднують стабільність монолітів із гнучкістю мікросервісів. Sebastião підкреслює роль таких підходів у забезпеченні стійкості критичних систем, особливо в контексті фінансових і банківських додатків. Таким чином, аналіз досліджень виявляє загальні тенденції розвитку мікросервісних технологій: автоматизація, адаптація до змін у навантаженні через AI, інтеграція нових підходів до моніторингу та поступовий перехід від монолітів до гібридних архітектур. Ці тенденції дозволяють забезпечувати високу продуктивність, стійкість і гнучкість сучасних систем.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження сучасних технологій та підходів, які

дозволяють покращити продуктивність, масштабованість і надійність мікросервісних систем, а також оцінка нових рішень, що застосовуються на практиці.

Виклад основного матеріалу. Традиційно програмні додатки будувалися як монолітні системи, де всі компоненти інтегровані в єдину кодову базу. Цей підхід забезпечував простоту розробки та розгортання, але з часом виникали проблеми з масштабованістю та підтримкою. З розвитком технологій та зростанням вимог ринку архітектурні підходи еволюціонували, що призвело до появи мікросервісної архітектури.

Виділялись наступні ключові аспекти мікросервісної архітектури:

1) масштабованість: мікросервісна архітектура дозволяє масштабувати окремі сервіси незалежно один від одного, що забезпечує ефективне використання ресурсів та підвищує продуктивність системи;

2) децентралізація: кожен мікросервіс розробляється та розгортається окремо, що дозволяє командам працювати автономно та впроваджувати зміни без впливу на інші частини системи [16];

3) незалежність сервісів: мікросервіси можуть бути реалізовані з використанням різних технологій та мов програмування, що надає гнучкість у виборі оптимальних рішень для кожного конкретного завдання [17].

Типовими викликами мікросервісної архітектури є складність тестування, взаємодія сервісів і забезпечення продуктивності. Тестування мікросервісів значно ускладнюється порівняно з монолітними додатками через необхідність моделювати взаємодії між різними сервісами, що вимагає комплексного підходу та спеціальних інструментів. Взаємодія сервісів також є значним викликом, оскільки забезпечення ефективної та надійної комунікації між численними мікросервісами потребує ретельного планування і використання сучасних технологій для інтеграції. Ще однією складністю є забезпечення високої продуктивності, оскільки розподілена природа мікросервісів може призводити до затримок у передачі даних, що потребує оптимізації архітектури та застосування рішень для мінімізації цих затримок. Усі ці аспекти потребують глибокого аналізу і правильного підходу для досягнення стабільної та ефективної роботи системи.

Сучасні технології та підходи до розгортання мікросервісів зосереджуються на автоматизації, інтеграції штучного інтелекту та застосуванні алгоритмів оптимізації. Це дозволяє вирішувати складні задачі масштабування, продуктивності, та ефективності використання ресурсів.

Автоматизація тестування є одним із ключових аспектів забезпечення якості в мікросервісній архітектурі. Розподілена природа мікросервісів вимагає ефективних підходів до тестування, які включають TDD, BDD, DDD, інтеграцію з CI/CD-процесами, а також використання симуляцій для моделювання взаємодії між сервісами. TDD (Test-Driven Development – розробка через тестування) – це підхід, при якому тести пишуться перед реалізацією функціоналу. В мікросервісах це дозволяє гарантувати, що кожен сервіс працює незалежно й відповідає очікуванням.

Переваги TDD включають покращення якості коду, забезпечення стабільності та швидке виявлення помилок. Завдяки написанню тестів до реалізації функціоналу код стає більш структурованим і легко підтримуваним, що спрощує його подальшу модифікацію. Крім того, тести гарантують стабільність системи, оскільки нові зміни перевіряються на сумісність із існуючим функціоналом, мінімізуючи ризик виникнення помилок. Ще однією важливою перевагою TDD є можливість виявляти помилки на ранніх етапах розробки, що значно знижує витрати на їх виправлення і прискорює процес розробки.

BDD (Behavior-Driven Development – розробка через поведінку) – це підхід, що орієнтується на опис поведінки системи у вигляді тестів, написаних зрозумілою для бізнесу мовою. BDD забезпечує прозорість, адже тести зрозумілі всім членам команди, включно з бізнес-аналітиками. Методологія фокусується на бізнес-логіці, гарантує відповідність реалізації очікуваній поведінці системи та полегшує автоматизацію регресійного тестування, що дозволяє перевіряти вплив змін на існуючі сценарії.

Domain-Driven Design (DDD) — це підхід до розробки програмного забезпечення, орієнтований на бізнес-домен. Основна ідея DDD полягає у глибокому розумінні предметної області (домену) і тісній взаємодії між технічними спеціалістами та експертами предметної області.

DDD забезпечує високу відповідність бізнес-вимогам, оскільки розробка базується на реальних потребах, що мінімізує ризик створення нерелевантного функціоналу. Уніфікована мова сприяє прозорості та покращує комунікацію між розробниками й бізнесом. Розподіл системи на незалежні контексти полегшує їх підтримку й розвиток, а також забезпечує масштабованість, дозволяючи окремим контекстам розвиватися незалежно.

На рис. 1 показано перетин трьох підходів до розробки програмного забезпечення: ATDD (Acceptance Test-Driven Development – тестування, орієнтоване на узгодження критеріїв прийняття), BDD і DDD.

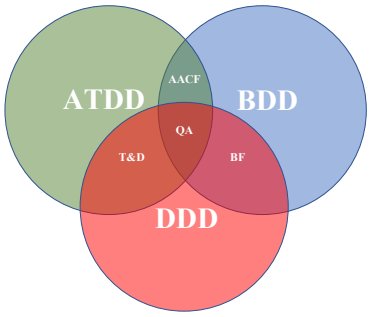


Рис. 1. Перетин трьох підходів до розробки програмного забезпечення

Внесені позначки:

– T&D – Testing & Design (тестування і дизайн);

– AACF – Automated Acceptance Criteria First (спочатку автоматизовані критерії прийняття);

– BF – Business Focus (фокус на бізнесі);

– QA – Quality Assurance (Забезпечення якості).

Рис. 1 показує, як ATDD, BDD і DDD доповнюють один одного, а їх об'єднаний підхід дозволяє створювати програмне забезпечення, орієнтоване на бізнес, протестоване і розроблене з урахуванням реальних потреб користувачів і домену.

Зони перетину:

– ATDD + BDD = AACF – об'єднує фокус на тестуванні з формулюванням зрозумілих бізнес-критеріїв;

– BDD + DDD = BF – узгоджує очікування бізнесу з технічним дизайном через опис поведінки, орієнтованої на домен;

– ATDD + DDD = T&D – забезпечує створення програмного забезпечення, яке відповідає тестам і точно відображає домен;

– ATDD + BDD + DDD = QA – зона, де всі три підходи об'єднуються, забезпечуючи високу якість розробки програмного забезпечення.

В той же час використання симуляцій дозволяє моделювати взаємодії між мікросервісами без потреби у запуску всіх залежностей. Це важливо для тестування розподілених систем.

Використання симуляцій забезпечує швидкість і зручність, дозволяючи заміняти запуск усіх сервісів «стабами» або «моками». Це допомагає виявляти проблеми у складних сценаріях, які важко відтворити в реальному середовищі, таких як відмови сервісів чи затримки в мережі. Крім того, симуляції економлять ресурси, оскільки споживають їх менше, ніж повноцінне середовище.

Серед основних інструментів для симуляцій: WireMock, який дозволяє створювати HTTP-запити та відповіді для тестування API; Mockito, що використовується для мокінгу залежностей у юніт-тестах; та Testcontainers, який забезпечує запуск тестів у контейнерах, імітуючи реальні умови.

Масштабованість і продуктивність є критичними аспектами мікросервісної архітектури, особливо в умовах зростаючих навантажень. Сучасні технології пропонують ефективні інструменти та підходи для підтримки цих аспектів. Горизонтальне масштабування (horizontal scaling) передбачає збільшення кількості екземплярів сервісу (подів) для обробки більшого навантаження. Kubernetes є провідним інструментом для оркестрації контейнерів і забезпечує автоматизацію цього процесу [18; 19, с. 2108; 20; 21; 22, с. 0185].

Сучасні підходи до масштабування та продуктивності мікросервісів зосереджуються на автоматизації та оптимізації процесів, зокрема через горизонтальне масштабування за допомогою Kubernetes, що автоматизує розширення ресурсів і забезпечує стабільність навіть при високих навантаженнях, використання gRPC для низьколатентної комунікації, ідеально підходить для систем з високими вимогами до швидкодії, а також кешування, яке знижує навантаження на базу даних і прискорює доступ до даних.

Автоматичне масштабування в Kubernetes використовує Horizontal Pod Autoscaler (HPA) для автоматичного збільшення або зменшення кількості подів залежно від метрик, таких як використання CPU чи пам'яті [22, с. 0186]. Наприклад, якщо трафік на API зростає, HPA запускає додаткові поди для обробки запитів. Рівномірний розподіл навантаження забезпечується через Kubernetes Load Balancer, який розподіляє запити між подами, гарантуванням рівномірного використання ресурсів. Масштабування кластера здійснюється за допомогою Cluster Autoscaler, який додає або видаляє вузли в кластері залежно від потреби у ресурсах. Серед його переваг: гнучкість у розподілі ресурсів, ефективне використання інфраструктури, автоматичне реагування на зміни у навантаженні. Обмеження включають потребу в ретельному налаштуванні HPA та Cluster Autoscaler для уникнення перевитрат ресурсів.

Завдяки використанню HTTP/2 і Protocol Buffers (Protobuf), gRPC забезпечує низькі затримки та компактну передачу даних [23, с. 122]. Переваги gRPC включають низьку латентність завдяки використанню HTTP/2, що дозволяє мультиплек-

сувати запити через одне з'єднання, зменшуючи затримки, високу продуктивність завдяки компактній серіалізації Protobuf, що знижує обсяг переданих даних, а також підтримку двостороннього стрімінгу, що дозволяє передавати дані в реальному часі між клієнтом і сервером.

Переваги gRPC включають високу пропускну здатність, швидку взаємодію між сервісами та підтримку багатьох мов програмування. Однак є й обмеження: складність налаштування у порівнянні з REST та менша підтримка у браузерах, оскільки для цього потрібен gRPC-Web.

Кешування для підвищення швидкості доступу до даних є одним із ключових методів оптимізації продуктивності. Такі інструменти, як Redis і Memcached, дозволяють зберігати часто використовувані дані у пам’яті для швидкого доступу [24, с. 64877].

Кешування забезпечує швидкий доступ до даних, оскільки читання з пам'яті значно швидше, ніж з дискових баз даних, зменшує навантаження на базу даних, що дозволяє уникнути вузьких місць, а також надає гнучкість, дозволяючи кешувати будь-які дані, від API-відповідей до результатів складних обчислень. Однак є й обмеження: потреба в управлінні TTL для уникнення застарілих даних та обмежений обсяг пам'яті для великих даних.

Спостережуваність є критично важливим аспектом сучасних мікросервісних систем. Здатність моніторити, аналізувати та реагувати на метрики, логи й трасування запитів є ключем до підтримки продуктивності, надійності та стійкості мікросервісів. Нові підходи до спостережуваності зосереджені на інтеграції даних, автоматизації процесів та зниженні впливу моніторингу на систему [25, с. 1981].

На рис. 2 представлено основні складові спостережуваності (Observability) у розподілених системах, що ілюструє концепцію, де спостережуваність формується з кількох типів даних, які забезпечують повну картину стану системи [26, с. 3197].

Три основні стовпи спостережуваності:

1. Logs (Логи): записи подій, які генеруються під час виконання системи. Логи допомагають виявляти непередбачувану поведінку та помилки у компонентах мікросервісів. Вони є найпоширенішим джерелом інформації для аналізу помилок і несправностей;

2. Metrics (метрики): числові значення, які описують стан або продуктивність системи (наприклад, використання CPU, час відповіді, обсяг пам'яті). Метрики дозволяють відстежувати зміни у реальному часі;

3. Traces (трасування): інформація про шлях виконання запиту через різні сервіси в системі. Трасування забезпечує прозорість взаємодії між мікросервісами, що допомагає виявляти вузькі місця.

Додаткові метрики включають досвід користувачів, що надає інформацію про взаємодію з системою та дозволяє оцінювати якість обслуговування, події, які фіксують важливі моменти часу, що сигналізують про зміни стану системи або її поведінки, залежності додатків, що описують, як компоненти взаємодіють між собою, і є критичними для аналізу відмов і оптимізації, а також логи розгортання, які містять дані про зміни конфігурації та процеси розгортання, що можуть спричинити збої або вплинути на продуктивність системи.

Для забезпечення спостережуваності в розподіленій системі важливо збирати дані не тільки з окремих додатків, але й із усієї IT-інфраструктури [27, с. 385]. Поєднання логів, метрик, трасувань та інших типів даних дозволяє операторам швидко визначати, де, що і коли сталося, а також передбачати потенційні проблеми.

Поєднання основних та додаткових метрик дозволяє створити повну картину про роботу

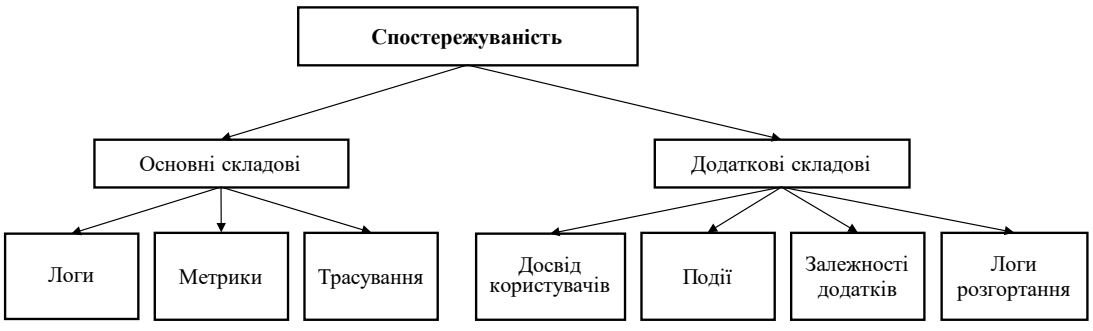


Рис. 2. Основні складові спостережуваності за системами на базі мікросервісної архітектури

системи, підвищити ефективність виявлення проблем і швидкість реагування. Це критично важливо для сучасних розподілених систем, особливо для мікросервісної архітектури. Adaptive Observability – це підхід до динамічного налаштування моніторингу залежно від поточного навантаження та стану системи [28]. Основні принципи полягають у збиранні лише необхідних даних у моменти високого навантаження для зниження впливу моніторингу на систему, а також в автоматичній адаптації рівня деталізації даних до поточного стану системи.

Переваги включають зниження витрат на зберігання та обробку даних, підвищення ефективності системи моніторингу та швидке реагування на зміни у навантаженні. Нові підходи до спостережуваності дозволяють уніфікувати процеси збору даних за допомогою OpenTelemetry, забезпечити прозорість взаємодії між сервісами через Jaeger, підвищити ефективність моніторингу ресурсів за допомогою Prometheus, збирати низькорівневу інформацію для глибокого аналізу через eBPF та динамічно адаптуватися до змін у системі з використанням Adaptive Observability.

Ці інструменти та методи є критично важливими для побудови стійких і продуктивних мікросервісних систем у реальних умовах. Зведена харктеристика інструментів наведена в табл. 1.

Поєднання описаних інструментів з підходами eBPF та Adaptive Observability дозволяє розробникам будувати ефективні системи спостережуваності. Ці методи знижують витрати, забезпечують високу продуктивність та швидке реагування на зміни, що робить їх критично важливими для сучасних мікросервісних архітектур.

Основними напрямами інтеграції штучного інтелекту в роботу з мікросервісами є прогнозування ресурсів за допомогою Predictive Analytics, оптимізація масштабування через Reinforcement Learning, використання Anomaly Detection для автоматичного коригування конфігурацій.

Прогнозна аналітика (Predictive Analytics) базується на використанні машинного навчання для аналізу історичних даних і прогнозування майбутніх потреб у ресурсах. Алгоритми аналізують метрики, такі як трафік, використання CPU/пам'яті або пікові навантаження. На основі отриманих прогнозів система може заздалегідь виділяти або звільняти ресурси, забезпечуючи безперебійність роботи. Так, наприклад, Netflix використовує Predictive Analytics для оптимізації розподілу серверів у різних регіонах, що дозволяє уникати перевантажень у пікові години [29].

Оптимізація масштабування через Reinforcement Learning (метод навчання системи через нагородження за успішні дії) використовує RL-агенти, які навчаються оптимізувати масштабування мікросервісів залежно від змін у навантаженні (наприклад, система може визначити, коли краще запускати нові екземпляри сервісу, щоб зменшити затримки або знизити вартість. Наприклад, Amazon Web Services застосовує RL для адаптивного масштабування своїх сервісів, що підвищує ефективність використання ресурсів [30].

Використання Anomaly Detection (виявлення аномалій) для автоматичного коригування конфігурацій дозволяє системі ідентифікувати та реагувати на відхилення від нормальної поведінки. Алгоритми машинного навчання аналізують метрики, наприклад, раптове збільшення затримок або споживання пам'яті. У разі виявлення аномалії система може автоматично перезапустити сервіс, масштабувати його або повідомити адміністратора. Так Google Kubernetes Engine (GKE) інтегрує аномалії для динамічної адаптації сервісів [31].

Використання Kubernetes з AI-driven orchestration інтегрує AI для автоматизації роз-

Таблиця 1

Особливості популярних інструментів спостережуваності

Інструмент	Основна функція	Особливості	Переваги	Обмеження
OpenTelemetry	Моніторинг, трасування та логування	Підтримує стандарти для збору телеметрії. Інтеграція з багатьма платформами.	Уніфікований підхід до спостережуваності. Гнучкість інтеграції з Prometheus, Jaeger, Grafana тощо.	Вимагає ручного налаштування інтеграцій.
Jaeger	Розподілене трасування	Відстежує запити між мікросервісами. Побудова залежностей між викликами.	Зручна візуалізація трасування. Швидке виявлення вузьких місць у системі.	Фокус лише на трасуванні.
Prometheus	Збір і зберігання метрик	Підтримує PromQL для аналізу даних. Інтеграція з Grafana для візуалізації.	Легка інтеграція. Ідеально підходить для моніторингу Kubernetes.	Обмеження у зборі логів та трасування.

поділу ресурсів і перенаправлення трафіку. Kubernetes автоматично адаптує кількість подів, перенаправляє трафік та розподіляє ресурси залежно від метрик. Інтеграція AI дозволяє передбачати зміни у навантаженні та заздалегідь оптимізувати конфігурацію кластера.

Інтеграція штучного інтелекту та алгоритмів оптимізації відкриває нові можливості для управління мікросервісами. Завдяки AI-driven orchestration, Predictive Analytics та автоматизації процесів CI/CD компанії можуть досягати високої продуктивності, ефективного масштабування та стабільності системи. Ці підходи стають стандартом для організацій, які прагнуть розробляти інноваційні та надійні хмарні сервіси.

Гібридна архітектура, яка поєднує моноліт і мікросервіси, стає популярним рішенням у ситуаціях, коли повний перехід до мікросервісної архітектури неможливий або недоцільний [32]. Гібридний підхід до архітектури дозволяє поєднувати переваги монолітів і мікросервісів, що стає у нагоді за таких кейсів. Поетапна міграція передбачає використання мікросервісів для нових функцій, залишаючи основний функціонал у стабільному моноліті.

Багато організацій починають із моноліту, але з часом, через зростання вимог до масштабованості, функціональності та швидкості оновлення, виникає потреба у переході до мікросервісів. Повна перебудова архітектури може бути дороговартісною, часозатратною і ризикованою через можливі збої. Інтеграція застарілих систем здійснюється через API Gateway, який об'єднує старі системи з сучасними мікросервісами.

Деякі системи, наприклад, основні транзакційні процеси у банках, дуже стабільні і не потребують частих змін, тому доцільно залишити цей функціонал у моноліті, а мікросервіси використовувати для нових функцій, таких як мобільні додатки чи аналітичні сервіси. Реалізація нових функцій вимагає гнучкості, і гібридні архітектури дозволяють поступово впроваджувати інновації без значних ризиків для існуючих систем. Старі системи (legacy) часто не підтримують прямий перехід до мікросервісів через архітектурні обмеження, тому одним із рішень є інтеграція через API Gateway, який виступає посередником між монолітом і мікросервісами. Банківські системи є яскравим прикладом використання гібридної архітектури через складність і критичність їхніх основних функцій.

Монолітні компоненти включають обробку транзакцій, управління рахунками та процеси авторизації та автентифікації. Мікросервіси, у свою чергу, охоплюють аналітику та звітність, мобільні додатки та системи управління лояльністю (cashback, бонуси).

Проте гібридна архітектура має низку обмежень. По-перше, складність інтеграції, оскільки забезпечення коректної взаємодії між моноліт ом і мікросервісами вимагає додаткових зусиль. По-друге, ускладнення моніторингу, оскільки необхідно контролювати як моноліт, так і мікросервіси, що збільшує навантаження на команди DevOps. Останнє обмеження — можливість технічного боргу, адже якщо перехід до мікросервісів затягується, моноліт може стати «пляшковим горлом» в роботі системи

Гібридна архітектура є ефективним рішенням для організацій, які прагнуть поступово інтегрувати мікросервіси у свої системи. Завдяки поєднанню моноліту для стабільних функцій та мікросервісів для інноваційних компонентів, цей підхід дозволяє оптимізувати процеси, мінімізуючи ризики. Банківські системи та компанії, що працюють із застарілими системами, активно використовують цей підхід для збереження стабільності та швидкого впровадження нових технологій.

Висновки. Мікросервісна архітектура є одним із ключових напрямків сучасної розробки програмного забезпечення завдяки її здатності забезпечувати гнучкість, масштабованість і надійність систем. Однак разом із перевагами вона має низку викликів, таких як складність інтеграції, необхідність у динамічному масштабуванні, продуктивність, забезпечення спостережуваності та безпека. Проведене дослідження дозволяє виявити сучасні технології, які допомагають вирішувати ці проблеми.

Серед основних напрямів удосконалення роботи з мікросервісами слід відзначити автоматизацію використання CI/CD-пайплайнів, динамічне управління ресурсами через Kubernetes, використання автоматизованих рішень для розгортання, що дозволяє знижувати складність розробки та пришвидшувати адаптацію систем до змін. Це особливо важливо в умовах високих навантажень, коли потрібна швидка реакція на зростання трафіку.

За останні роки реалізовано низку рішень в напрямі оптимізації продуктивності в мікросервісах, яка значною мірою залежить від застосування горизонтального масштабування, gRPC для швидкої комунікації та кешування за допомогою Redis або Memcached. Ці інструменти

не тільки підвищують швидкодію системи, але й дозволяють уникати перевитрат ресурсів.

Можливість спостережуваності також стала важливою умовою ефективної роботи розподілених систем. Такі інструменти, як OpenTelemetry, Prometheus і Jaeger, дозволяють виявляти проблеми на ранніх етапах, аналізувати метрики та трасування, а також забезпечувати прозорість у роботі мікросервісів. У цьому контексті адаптивний моніторинг стає особливо актуальним, дозволяючи зменшити вплив моніторингу на систему під час пікових навантажень.

Практично всі покращення в роботі з мікросервісами використовують штучний інтелект. Так Predictive Analytics, Reinforcement Learning і Anomaly Detection допомагають прогнозувати майбутні навантаження, адаптувати ресурси до змін та виявляти аномалії у роботі систем. Ці технології вже демонструють свою ефективність у реальних кейсах, таких як Netflix та Amazon Web Services.

Проведене дослідження показало, що сучасні технології та підходи значно розширюють можливості мікросервісної архітектури, підвищуючи її ефективність, стабільність та адаптивність, а це є основним чинником у виборі мікросервісної архітектури для створення систем, що відповідають сучасним вимогам бізнесу.

Список літератури:

1. Garimilla M. Microservices architecture: revolutionizing modern software development. *International Journal of Innovative Research.* 2024. Vol. 13. P. 16637-16645.

2. Dragoni N, Giallorenzo S., Lluch L., Mazzara M., Montesi F., Mustafin R., Safina L. Microservices: Yesterday, Today, and Tomorrow. *In Present and Ulterior Software Engineering*. 2017. P. 195-216. URL: https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/140638498/1606.04036.pdf .

3. Про мікросервісну архітектуру. URL: https://foxminded.ua/mikroservisna-arkhitektura (Дата звернення: 26.10.2024).

4. Scale Microservices Performance with Distributed Caching. URL: https://www.alachisoft.com/blogs/scale-microservices-performance-with-distributed-caching/ (Дата звернення: 26.10.2024).

5. Bravetti M., Giallorenzo S., Mauro J., Talevi I., Zavattaro G. Optimal and automated deployment for microservices, Fundamental Approaches to Software Engineering. 2019. Vol. 11424. P. 351-368. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-16722-6_21.

6. Fu Y., Gu S., Cheng L., Liu L. Performance evaluation of resource management schemes for cloud-native platforms with computing containers, *IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference (IPCCC).* 2022. P. 414-415. DOI: https://doi.org/10.1109/ipccc55026.2022.9894300.

7. Mustyala A. Dynamic resource allocation in Kubernetes: Optimizing cost and performance, *EPH - International Journal of Science and Engineering*. 2021. Vol. 7. no. 3. P. 59-71. DOI: https://doi.org/10.53555/ephijse.v7i3.237.

8. Mugeraya S., Devadkar K. Dynamic task scheduling and resource allocation for microservices in cloud, *Journal of Physics: Conference Series.* 2022. Vol. 2325. P. 1-10. DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/2325/1/012052

9. González S. Modular software design in distributed systems: Strategic approaches for building scalable, maintainable, and fault-tolerant architectures in modern microservice environments, *Eigenpub Review of Science and Technology*. 2023. Vol. 7. no. 1. DOI: https://doi.org/10.1007/s10916-020-1195-x.

10. Hang Y., Xiulei W., Changyou X., Bo X. A Microservice Resilience Deployment Mechanism Based on Diversity, *Security and Communication Networks*. 2022. P. 1-13. DOI: https://doi.org/10.1155/2022/7146716.

11. Sebastião F. P. The role of a microservice architecture on cybersecurity and operational resilience in critical systems, *Master's Thesis, University of Porto*. 2023. Vol. 2325. P. 1-10. DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/2325/1/012052.

12. Belkhiri A., Bushehri A.S., Magalhaes F., Nicolescu G. Transparent Trace Annotation for Performance Debugging in Microservice-oriented Systems, *ICPE '23 Companion: Companion of the 2023 ACM/SPEC International Conference on Performance Engineering*. 2023. P. 25-32. DOI: https://doi.org/10.1145/3578245.3585030.

13. Usman M., Ferlin S., Brunstrom A., Taheri J., "A Survey on Observability of Distributed Edge & Container-Based Microservices," *in IEEE Access*. 2023. Vol. 10, P. 86904-86919, DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3193102.

14. Mejía P. Best practices for microservice framework design, Advances in Intelligent Information Systems, *Journal of Intelligent Connectivity and Emerging Technologies*. 2022. Vol. 8. no. 4. P. 71-85. URL: https://questsquare.org/index.php/JOUNALICET/article/view/77/83.

15. Архітектура мікросервісів: Особливості, переваги, реальні приклади. URL: https://www.hostzealot.com.ua/blog/about-solutions/arxitektura-mikroservisiv-osoblivosti-perevagi-realni-prikladi (Дата звернення: 27.10.2024).

16. Порівняння ефективності мікросервісів та монолітних архітектур URL: https://peerdh.com/uk/blogs/programming-insights/comparing-the-efficiency-of-microservices-and-monolithic-architectures (Дата звернення: 28.10.2024).

17. Pedersen S.F. Enhancing microservices architecture with BDD, ATDD, and DDD in the IT industry (BAT3D). 2023. URL: https://medium.com/destinationaarhus-techblog/enhancing-microservices-architecture-with-bdd-atdd-and-ddd-in-the-financial-industry-7f97d5c3c8d0 (Дата звернення: 28.10.2023).
18. Vivek B.R. Performance impact of microservices architecture. The review of contemporary scientific and academic studies, *An International Multidisciplinary Online Journal*. 2023. Vol. 3. no. 6. DOI: https://doi.org/10.55454/rcsas.3.06.2023.010.
19. Oyeniran O., Adewusi A., Adeleke A., Akwawa L., Azubuko C. Microservices architecture in cloud-native applications: Design patterns and scalability, *Computer Science & IT Research Journal*. 2024. Vol. 5. no. 9, P. 2107-2124. DOI: https://doi.org/10.51594/csitrj.v5i9.1554.
20. Aksakalli I. K., Çelik T., Can A. B., Tekinerdoğan, B. Deployment andcommunication patterns in microservice architectures: A systematic literaturereview, Journal of Systems and Software. 2021. Vol. 180, P. 111014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jss.2021.111014
21. The Evolution of Data Centers: From Humble Beginnings to Technological Powerhouses. URL: https://www.linkedin.com/pulse/evolution-data-centers-from-humble-beginnings-akhil-sirasao-zrh6f/ (Дата звернення: 02.11.2024).
22. Shah J., Dubaria D. "Building modern clouds: using docker, kubernetes & google cloud platform," *IEEE 9th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, Las Vegas, NV, USA, 2019, P. 0184-0189. DOI: https://doi.org/10.1109/CCWC.2019.8666479
23. Cinque M., Della Corte R., Pecchia A., "Advancing Monitoring in Microservices Systems," *2019 IEEE International Symposium on Software Reliability Engineering Workshops (ISSREW)*, Berlin, Germany, 2019, P. 122-123, DOI: https://doi.org/10.1109/ISSREW.2019.00060.
24. Laghari A. A., He H., Khan A., Kumar N., Kharel R. Quality of experience framework for cloud computing (QoC), IEEE Access. 2018. Vol. 6, P. 64876–64890. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2865967
25. Sharma B., D. Nadig, "eBPF-Enhanced complete observability solution for cloud-native microservices," *ICC 2024 - IEEE International Conference on Communications*, Denver, CO, USA, 2024, P. 1980-1985. DOI: https://doi.org/10.1109/ICC51166.2024.10622329.
26. Monteiro D., Yu Y., Zisman A., Nuseibeh B. "Adaptive observability for forensic-ready microservice systems," *In IEEE Transactions on Services Computing*. 2023. Vol. 16, no. 5, P. 3196-3209. DOI: https://doi.org/10.1109/TSC.2023.3290474.
27. Koneni V. Microservices architectures using spring boot: embracing containerization and observability, *International Innovative Research Journal of Engineering and Technology*. 2024. Vol. 11. no. 3, P. 384-396.
28. Google Kubernetes Engine: Qwik Start. URL: https://www.cloudskillsboost.google/focuses/878?locale=uk&parent=catalog. (Дата звернення: 03.11.2024)
29. Gokul M. How Netflix Uses Artificial Intelligence. URL: https://www.argoid.ai/blog/netflix-ai (Дата звернення: 03.11.2024)
30. AWS Auto Scaling. URL: https://aws.amazon.com/autoscaling/ (Дата звернення: 03.11.2024)
31. T. Twain. Kubernetes & its Role in AI: Orchestrating End-to-End AI Pipelines. 2024. URL: https://amazic.com/kubernetes-its-role-in-ai-orchestrating-end-to-end-ai-pipelines/ (Дата звернення: 03.11.2024).
32. M. Puhl. Patterns for Microservices Architecture in Couchbase. 2021. URL: https://www.couchbase.com/blog/microservices-architecture-in-couchbase/ (Дата звернення: 21.07.2021).

Kozub V.V. PRACTICE OF USING NEW TECHNOLOGIES IN MICROSERVICE ARCHITECTURE OF SOFTWARE DEVELOPMENT

This article presents an analysis of the latest technologies in microservices architecture, which has long been a key concept in developing flexible, scalable, and reliable software systems. The microservices approach allows applications to be broken down into independent components that interact via clearly defined interfaces, ensuring modularity and scalability. The research methods include a literature review, analysis of existing technologies and approaches in the microservices domain, as well as examining practical examples of new tools used to address challenges in integration, scaling, and security. Specifically, the article focuses on new automation tools for deployment and testing processes, technologies for ensuring observability, performance optimization methods, and the integration of artificial intelligence for load forecasting and automated scaling. The main results of the study include a structured overview of key areas where microservices architecture is being enhanced, including: automation of pipelines for testing and deployment, use of technologies for caching and accelerating data access, integration of OpenTelemetry and Prometheus for monitoring, as well as AI integration for load analysis and forecasting. The research also highlights the significance of hybrid architectures that allow gradual integration of new technologies without disrupting the operation of legacy systems. The scientific novelty of the work lies in the comprehensive analysis of the latest technologies and their impact on the effectiveness of microservices architecture, as well as identifying promising directions for further research aimed at addressing existing challenges in integration, security, and scalability. An important contribution is the study of the impact of artificial intelligence and automation on improving microservices management efficiency. In the conclusions, it is noted that to further improve microservices architecture, newer tools for automation, machine learning, and artificial intelligence need to be more actively integrated, which will ensure efficient resource management, reduced latency, and enhanced security. Future research should focus on solving the integration challenges between old and new systems, as well as improving orchestration and observability processes.

Key words: *microservices architecture, deployment diversity, load balancing, system resilience, resource optimization.*

УДК 544.41 664.9.047
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/13

Коротинський А.П.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Абрамова А.О.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Складанний Д.М.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛІ РЕКТИФІКАЦІЙНОЇ КОЛОНИ У ВИРОБНИЦТВІ ОЦТОВОЇ КИСЛОТИ ТА ЇЇ СПРОЩЕННЯ ДЛЯ ЗАДАЧ КЕРУВАННЯ

У статті проведено аналізування стану проблеми, що присвячена розробленню математичних моделей з метою їх ефективного використання у системах автоматизованого керування. Все більше авторів приділяють увагу моделям, що враховують специфіку процесів, які протікають у об'єктах моделювання. Для комп'ютерного моделювання досліджуваних процесів та побудови точних математичних моделей все частіше застосовують універсальний програмний комплекс ANSYS, що використовує метод кінцевих елементів для побудови сіток в ANSYS Meshing. Об'єктом дослідження є процес кипіння у кубі ректифікаційної колони при виробництві оцтової кислоти з метою побудови спрощеної математичної моделі для використання у задачах синтезу та керування. Проаналізовано процес виробництва оцтової кислоти та його особливості, визначено, що якість кінцевого продукту досягається шляхом ректифікації. Побудовано математичні моделі теплообміну і масообміну досліджуваного об'єкту із врахуванням початкових умов. Подальше моделювання досліджуваного об'єкту здійснювалося за допомогою програмного середовища ANSYS. Для моделювання сформовано наступні вихідні дані: геометричний опис об'єкту, фізичні властивості середовища, з яким він взаємодіє та початкові умови моделювання. Створена сіткова модель із врахуванням необхідних параметрів, вибір яких зумовлений типом процесу, що досліджується, та обчислювальною потужність доступного обладнання. У результаті математичного моделювання в ANSYS процесу випаровування побудовано поля розподілу модельованих величин та визначено зміни параметрів у часі. Отримано складну модель, що не пристосована до задач синтезу та дослідження систем керування. Отримана модель потребує спрощення із виконанням основних вимог: відповідність її поведінки вихідній моделі та здатність швидко розраховувати стан системи. Тому проведено ідентифікацію об'єкта з використанням MatLab System Identification Toolbox. За отриманими графіками відповідності ідентифікованих моделей різних порядків встановлено, що найкращі результати дає модель сьомого порядку. На основі обраної моделі побудовано перехідні характеристики математичної моделі за каналами регулювання та збурення.

Ключові слова: *керування, математичне моделювання, ректифікація, випаровування, ідентифікація, канал регулювання, канал збурення.*

Постановка проблеми. Оцтова кислота, як фундаментальна органічна сполука, відіграє ключову роль у численних промислових процесах. Її виробництво, зокрема, вимагає високоточних і ефективних технологій розділення сумішей, яке відбувається в ректифікаційних колонах. Вірне розуміння фізико-хімічних явищ, що відбуваються всередині колони та урахування впливу різних параметрів, таких як температура, тиск, склад суміші тощо у поєднанні із застосуванням сучасних методів здатне забезпечити якісне моделювання процесу та ефективне використання одержаних моделей. В той же час слід дотриматися компромісу між складністю одержаної математичної моделі та витрат ресурсів на її вирішення, що є важливим для задач синтезу та дослідження автоматизованих систем керування виробничими процесами. Тому, розроблення спрощеної моделі ректифікаційної колони у виробництві оцтової кислоти з метою використання у задачах керування залишається **актуальним.**

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Число наукових публікацій, присвячених розробленню математичних моделей, які можна ефективно використовувати у системах автоматизованого керування останнім часом неухильно зростає. Їх авторами все частіше враховуються глибша суть процесів, які протікають у об'єктах моделювання. Зокрема, автори роботи [1] розробили математичну модель, яка описує процес теплообміну між скловарною піччю та навколишнім середовищем. Ця модель дозволяє значно краще розуміти процеси теплопередачі від печі до повітря, стін, інших об'єктів. Розроблена модель дозволяє оптимізувати роботу печі для досягнення максимальної ефективності та мінімізації втрат тепла, а також дозволяє передбачити, як змінюватимуться теплові потоки в печі при зміні зовнішніх умов або параметрів роботи. Подібними міркування щодо підвищення ефективності процесу у свої роботі керувалася авторка статті [2], яка в своїй роботі зосередилися на розробленні та аналізуванні системи програмного керування, що використовується для оптимізації процесу випалювання вуглецевих виробів. Цей процес є критичним у багатьох галузях промисловості, таких як виробництво металургійної продукції, кераміки та інших матеріалів. У роботі [3] автори зосередилися на розробленні математичної моделі для розпилювального сушильного пристрою, яка б точно описувала фізичні процеси, що відбуваються під час сушіння розпилених рідин. Така модель є невід'ємною частиною створення ефективних систем автоматичного керування процесом сушіння. Розроблена модель використана для розроблення алгоритмів керування, які б дозволяли оптимізувати процес сушіння за заданими параметрами. Автори статті [4] зосередилися на розробленні імітаційної моделі кожухотрубчастого теплообмінника, який широко використовується в нафтогазовій промисловості. Запропонована ними модель дозволяє вивчити процеси теплообміну в теплообміннику та оптимізувати його роботу.

В останні роки для розроблення достатньо точних моделей технологічних процесів авторами застосовується система моделювання *ANSYS* [5]. Ця система дозволяє будувати високоточні математичні моделі об'єктів, проте значний час, витрачений на розв'язання, ускладнює їх використання у системах автоматизації. Зокрема, такий підхід продемонстрований авторами у роботі [6]. Автори досліджують, вплив зміни початкової температури повітря, яке подається для горіння палива на температурний режим процесу випалювання вуглецевих виробів. Автори [7] детально розглядають важливий етап проведення чисельних розрахунків за допомогою методу обчислювальної динаміки рідин (CFD – побудова сітки в програмному комплексі *ANSYS Meshing*). Якість побудованої сітки безпосередньо впливає на точність і збіжність розрахунків, тому цей етап є критичним для отримання достовірних результатів. Автори детально описують суть методу кінцевих елементів, який є основою для побудови сіток в *ANSYS Meshing*. Запропонувати досить точну модель, яка адекватно відображає поведінку матеріалів – бетону і арматури – під дією динамічних навантажень, вдалося авторам [8]. Зокрема, вони зосереджували увагу на впливі швидкості навантаження та методу побудови сітки на результати чисельного моделювання в програмному комплексі *ANSYS*.

Постановка завдання. Метою статті є побудова моделі процесу кипіння, що відбувається у кубі ректифікаційної колони у виробництві оцтової кислоти з наступним спрощенням з метою використання у задачах синтезу та дослідження систем керування.

Виклад основного матеріалу. Проаналізувавши процес виробництва оцтової кислоти та його особливості, визначено, що якість продукту суттєво залежить від його чистоти. В більшості випадків очищення здійснюється шляхом ректифікації, яка полягає в розділенні сумішей на фази по температурах кипіння. Очевидно, що основним керуючим впливом є температура суміші. Зазвичай температура речовини задається у зоні кипіння ректифікаційної колони – кубі колони. Таким чином, кип'ятильник ректифікаційної колони є важливим для моделювання об'єктом.

Для математичного моделювання процесу, що відбувається у будь-якому апараті, необхідно врахувати всі його складові, зокрема процеси масообміну і теплообміну. У випадку куба колони, теплообмін відбувається перенесенням тепла через стінку, а масообмін представлений перенесенням маси з об'єму рідини в процесі випаровування. Виходячи з цих міркувань, складемо математичну модель процесу випалювання з описом всіх фізико-хімічних складових.

Оскільки теплопередача у кубі ректифікаційної колони відбувається від потоку пари через стінку, то для опису цього процесу використовується система рівнянь, яка включає у себе рівняння Нав'є-Стокса (1, 2), рівняння теплопровідності (3) та рівнянням неперервності середовища (4).

$$\frac{\partial \underline{v}}{\partial t} + (\underline{v}\nabla)\,\underline{v} = -\frac{1}{\rho_0}\nabla P + \nu\Delta\underline{v} - \beta\,\underline{Tg} \qquad (1)$$

$$\rho = \rho_0\,(1 + \beta T) \qquad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \underline{v}\nabla T = a\Delta T \qquad (3)$$

$$div\,(\underline{v}) = 0 \qquad (4)$$

Розв'язок цієї системи можливий за наявності початкових умов. Швидкість потоку виходячи з діаметру труби, густини та витрати визначається за рівнянням (5).

$$v(x) = \frac{4G}{\rho\pi d_i^2} \qquad (5)$$

Визначення коефіцієнту тепловіддачі проводимо за критеріальними рівнянням (6).

$$= Nu\,\frac{\lambda}{d_i};$$

$$Nu = 0,023\,Re^{0,8}\,Pr^{0,37}\varepsilon; \qquad (6)$$

$$Re = \frac{v(x)\,d_i\rho}{\mu}, \quad Pr = \frac{C_p\mu}{\lambda}, \quad \varepsilon \approx 1.$$

Рівняння стаціонарної теплопровідності.

$$\alpha_0\Pi_0\,(T_0 - T_s) = k_i\Pi_i\,(T_s - T_i);$$

$$\Pi_0 = \pi d_o; \quad \Pi_i = \pi d_i$$

$$k_i = \left(\frac{1}{\alpha_i} + \frac{d_i ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2\lambda_m}\right)^{-1}$$

Записавши вихідні умови, маємо змогу одержати рівняння, що описує температуру стінки (7).

$$T_s = \frac{\alpha_o d_o T_o + k_i d_i T_i}{\alpha_o d_o + k_i d_i} \qquad (7)$$

де d_i – внутрішній діаметр, d_o – зовнішній діаметр трубки, T_o – температура зовні трубки, T_i – температура всередині трубки, α_o – коефіцієнт тепловіддачі, k_i – коефіцієнт теплопровідності.

Основним масообмінним процесом у випарнику є кипіння – процес інтенсивного пароутворення, як на поверхні рідини, так і по її об'єму. По об'єму рідини утворюються зони поділу фаз, між рідиною та бульбашками повітря та пари. Основна умова початку кипіння рідини описується рівнянням (8).

$$p_n = p_0 + \rho gh + \frac{2\sigma}{R} \qquad (8)$$

де p_n – це тиск насиченої пари в бульбашці, p_0 – зовнішній тиск, ρ – густина, g – прискорення вільного падіння, h – висота стовпа рідини над бульбашкою, σ – коефіцієнт поверхневого натягу.

Моделювання об'єкту здійснювалося за допомогою програмного середовища *ANSYS*, яке дозволяє моделювати процеси, що протікають в апаратах виходячи з заданих фізичних властивостей [9]. Для моделювання необхідно задати геометричний опис об'єкту, фізичні властивості середовища, з яким він взаємодіє, та початкові умови моделювання.

З геометричної точки зору кип'ятильник являє собою рекуперативний теплообмінник, в якому теплообмін відбувається через металеву стінку. Зазвичай такий теплообмінник має одну трубу, в якій буде гріюча пара, а навколишній об'єм заповнений рідиною, що підлягає нагріванню. Для використання створеної геометрії в розрахунках потрібно визначити усі складові та на її основі створити сітку. Позначення всіх складових об'єкту представлено на рис. 1. Створення сіткової моделі є невід'ємною частиною процесу комп'ютерного інженерного моделювання. Якість сітки впливає на точність, збіжність і швидкість отримання рішення. Час, витрачений на створення сітки, часто займає значну частину загального часу комп'ютерного інженерного розрахунку. Крім того, значна кількість елементів сітки вимагає значних обчислювальних ресурсів, тож слід дотримуватися балансу точності моделювання з часом розрахунку [7]. У сучасних програмних пакетах використовуються декілька основних видів сітки для 3D моделювання: тетрагедральна, декартова і гексаедральна тощо.

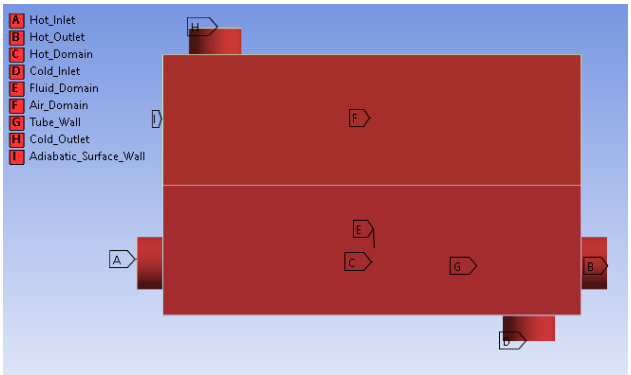


Рис. 1. Компоненти кип'ятильника

Існує ряд способів, що дозволяють вирішувати рівняння переносу в області приграничних шарів за наявності високих градієнтів параметрів потоку [8]. Для побудови сітки необхідно задати параметри, які визначають її деталізацію. Перелік обраних параметрів наведено на рис. 2. Вибір параметрів зумовлений типом процесу, що досліджується, та обчислювальною потужність доступного обладнання.

Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Element Order	Linear
Element Size	1,e-002 m
Export Format	Standard
Export Preview Surface Mesh	No
Sizing	
Use Adaptive Sizing	No
Growth Rate	Default (1,2)
Max Size	5,e-002 m
Mesh Defeaturing	Yes
Defeature Size	Default (5,e-005 m)
Capture Curvature	Yes
Curvature Min Size	Default (1,e-004 m)
Curvature Normal Angle	Default (18,°)
Capture Proximity	No
Bounding Box Diagonal	1,1 m
Average Surface Area	0,10022 m²
Minimum Edge Length	0,2 m

Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Target Skewness	Default (0,9)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	None
Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Advanced	
Number of CPUs for Parallel...	Program Controlled
Straight Sided Elements	
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Topology Checking	Yes
Pinch Tolerance	Default (9,e-005 m)
Generate Pinch on Refresh	No

Рис. 2. Параметри сітки

Сітка отримана на основі заданої геометрії наведена на рис. 3.

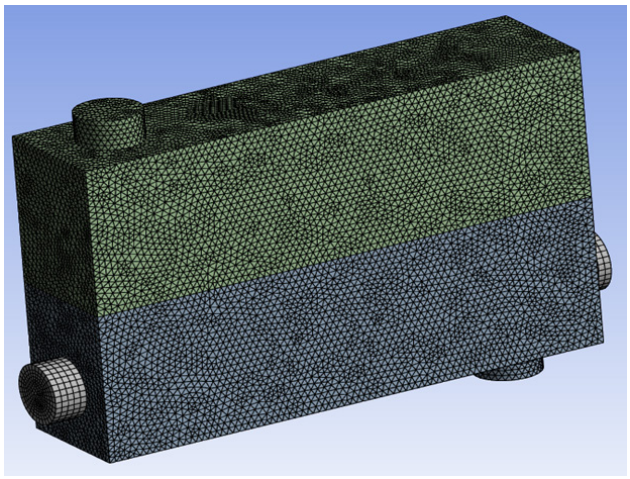


Рис. 3. Сітка, накладена на модельований об'єкт

Налаштування параметрів речовин. Розв'язання математичної моделі передбачає вказування числових значень параметрів середовища. Оскільки водяна пара розповсюджена речовина, її параметри описані у вбудованій бібліотеці речовин *ANSYS*. Параметри оцтової кислоти, в свою чергу, не описані, тому проведено їх пошук. Зазначимо, що для процесу в кип'ятильнику важливими є параметри, як рідкої так і газової фаз. Частину параметрів оцтової кислоти задаємо як константи, для інших параметрів вирахуємо через їх залежність від температури. Вікно встановлення параметрів речовини *ANSYS* показано на рис. 4. Значення запозичені з [10].

Теплоємність, теплопровідність та в'язкість сильно залежать від температури і представлені таблицями залежності [10]. Вікно введення даних для теплопровідності показане на рис. 5, теплоємність та в'язкість вводяться аналогічно.

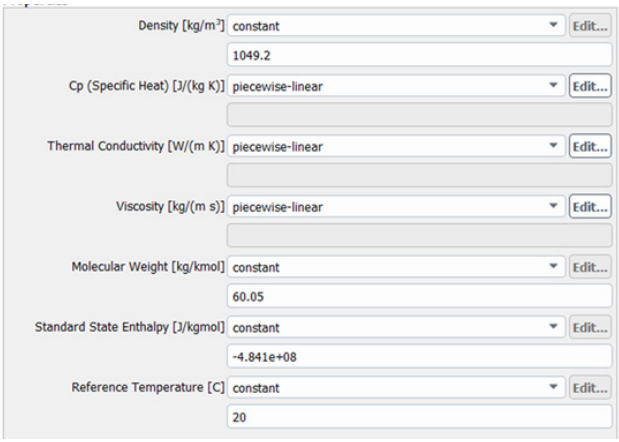


Рис. 4. Вікно зміни параметрів рідини

Аналогічним чином описуємо параметри газової фази. Густина речовини 2.52861 кг/м³. Стандартна ентальпія утворення 434.8 кДж/моль. Теплоємність, теплопровідність та в'язкість парів оцтової кислоти залежить від температури. Для теплоємності ця залежність в інтервалі температур [298; 1000] К виражається у вигляді рівняння (9).

$$C_p(T) = 14{,}82 + 0{,}1967 \cdot T - 7.77\ 10^{-5} \cdot T^2 \qquad (9)$$

Вікно введення залежності для теплоємності парів оцтової кислоти представлені на рис. 6. Дві інші залежності введені таблично аналогічно рідкій фазі.

Основним процесом в апараті є кипіння, для моделювання якого необхідно вказати параметри випаровування. Для розрахунку буде використана багатофазова модель, вікно налаштування представлено на рис. 7.

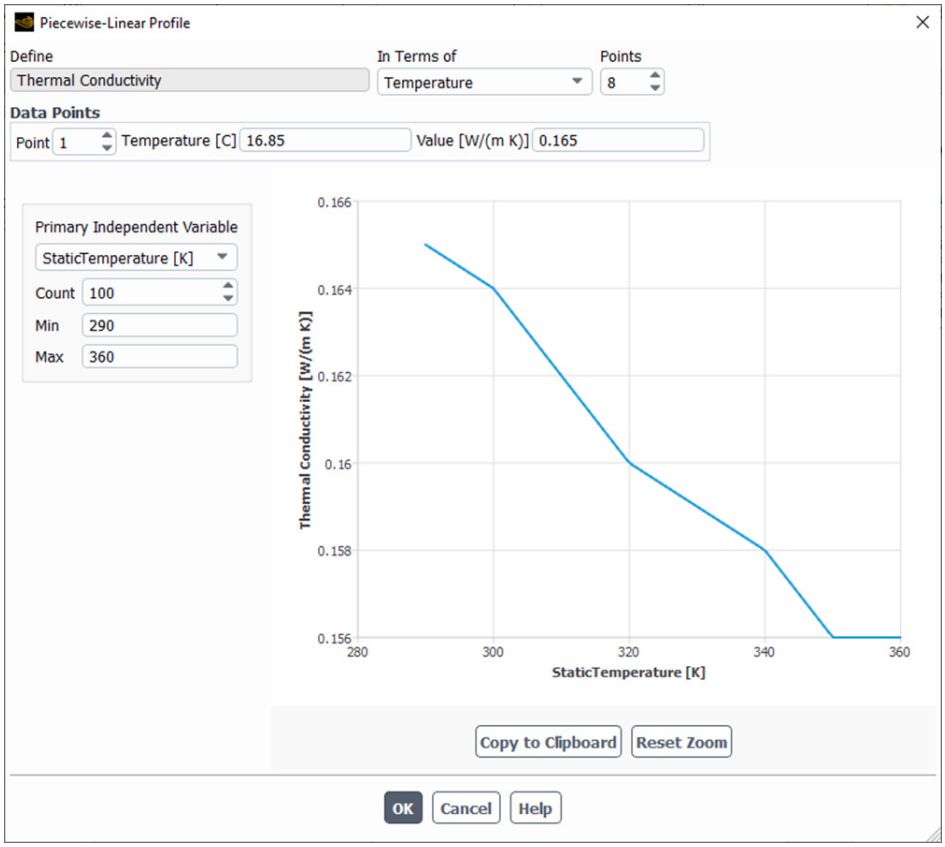


Рис. 5. Введення залежності для теплопровідності оцтової кислоти в рідкій фазі

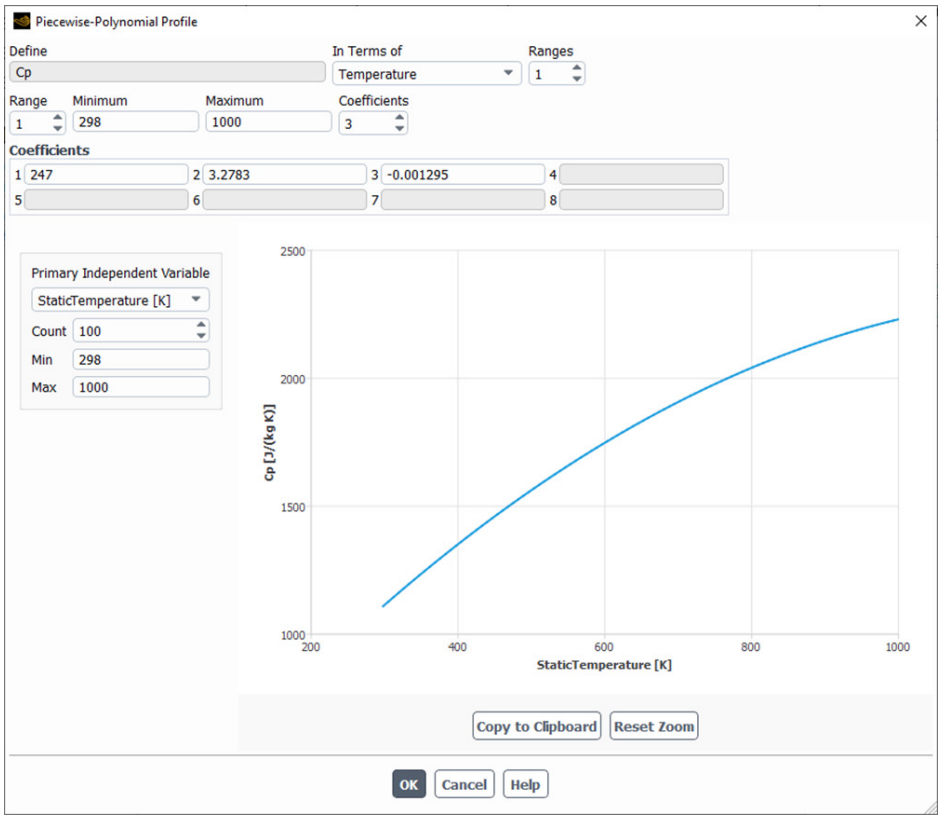


Рис. 6. Введення залежності для теплоємності парів оцтової кислоти

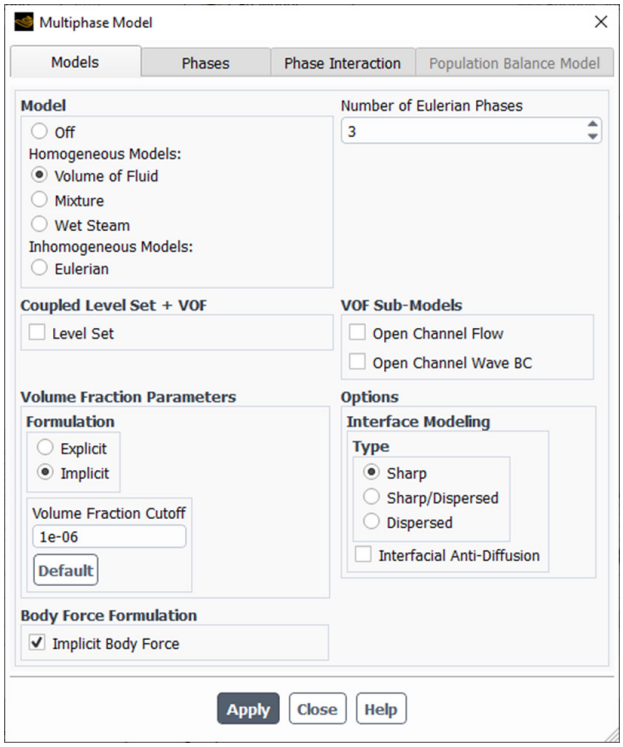


Рис. 7. Налаштування розрахунків багатофазового середовища

Сила поверхневого тертя між рідкою та газовою фазами оцтової кислоти 0.019 Н/м. Температура насичення оцтової кислоти 118°C [10]. Для обчислення потоку використано наближення k-ε, повні налаштування параметрів моделі розрахунку потоку приведено на рис. 8.

Встановимо параметри вихідних потоків. Для гріючої пари витрата буде дорівнювати 0.05 кг/с, температура 200°C. Витрата холодної рідини на вході в апарат 0.04 кг/с за температури 60°C. Тривалість розрахунку багатофазової моделі склало 20 секунд, поділені на 2000 часових кроків. Для розрахунку одного часового кроку здійснюється до 20 ітерацій. Результат записується до журналу для можливості аналізу отриманих результатів і подальшої їх обробки.

Результати моделювання. Провівши математичне моделювання процесу випаровування побудуємо поля розподілу модельованих величин та прослідкуємо зміни параметрів у часі. На першому кроці проведемо аналізування розподілу величин у просторі в кінцевий момент часу. Це дозволить оцінити адекватність отриманої моделі. Основний процес, який нас цікавить – це випаровування. Щоб перевірити достовірність моделі для розрахунку випаровування в *ANSYS* передбачено показник – об'єм фракції [5], який показує концентрацію обраної фракції на одиницю об'єму, його значення можуть знаходитись в інтервалі від 0 до 1,

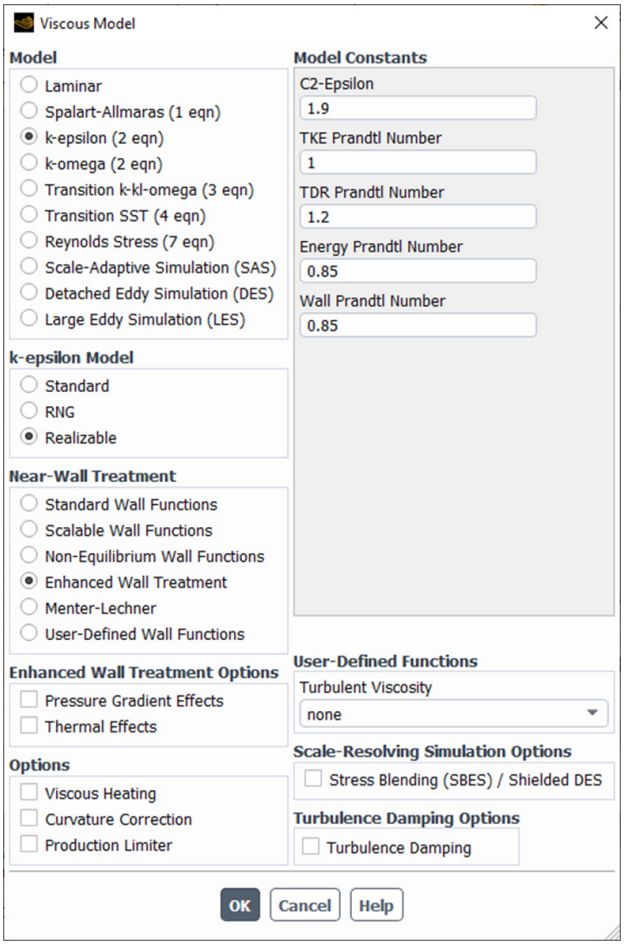


Рис. 8. Налаштування моделі розрахунку потоку

де 0 означає відсутність фракції, а 1 – обрана фракція заповнює весь об'єм. Розподіл об'єму фракції оцтової кислоти зображений на рис. 9.

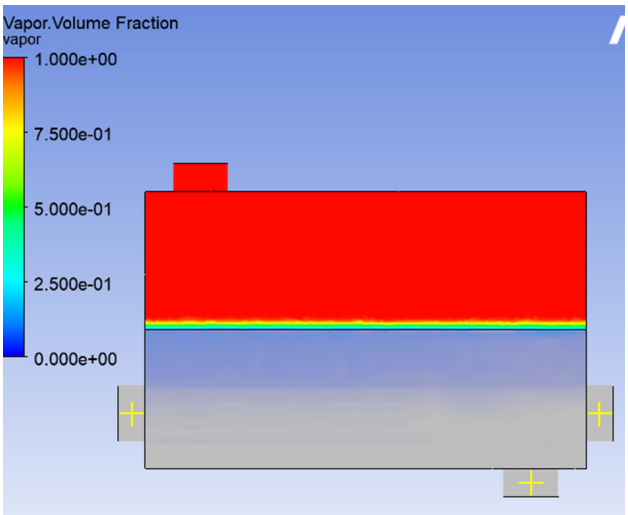


Рис. 9. Розподіл парів оцтової кислоти

Судячи з розподілу об'єму парів оцтової кислоти, процеси розподілу фаз розраховуються адекватно. На рис. 9 видно характерну зону пере-

ходу з рідкої фази до газової. Також можна спостерігати, що невелика кількість газової фази розчинена в рідині, що прилягає до зони фазового переходу, це свідчить про те, що відбувається саме процес кипіння, а не випаровування. Оскільки пара має меншу густину, ніж рідина, вона піднімається вгору. Це підтверджується рухом потоків, що представлений на рис. 10.

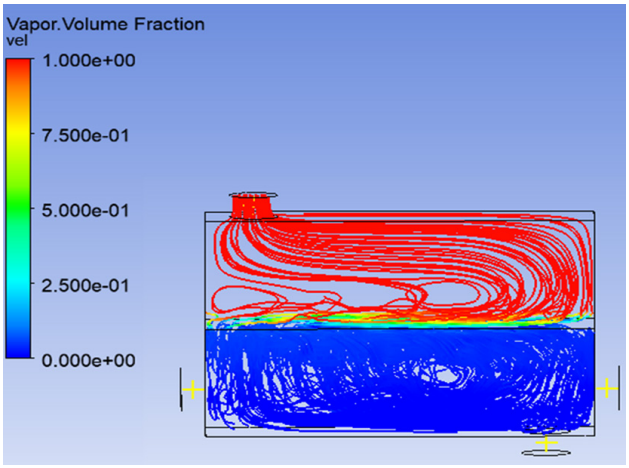


Рис. 10. Рух потоків речовини

Приведення розробленої моделі до задач керування. Перевіривши адекватність моделі, експортуємо дані зміни в часі параметрів необхідних для синтезу системи керування [11, 12, 13]. Керуючим впливом є витрата гріючої пари. Збурення – витрата холодної речовини. Вихідними параметрами є температура та витрата парів оцтової кислоти на виході з апарату.

За допомогою програмного забезпечення *ANSYS* отримана комплексна складна для розрахунків модель, не пристосована до задач синтезу та дослідження систем керування. Для подальшого дослідження модель потребує спрощення. Основними вимогами до спрощеної системи є відповідність її поведінки вихідній моделі та здатність швидко розраховувати стан системи [11, 13]. Для вирішення поставленого завдання проведемо ідентифікацію об'єкта з використання програмного рішення *System Identification Toolbox*, що входить в склад середовища *MatLab* [14]. У якості даних для проведення процедури ідентифікації використаємо отримані в результаті математичного моделювання в середовищі *ANSYS* досліджуваного апарату за різних умов та режимів його роботи.

Для ідентифікації [12, 13, 15] необхідно сформувати набори даних на вході і виході. Вихідні дані представлені витратами гріючої пари та оцтової кислоти, що надходить в апарат. Набір вихідних параметрів сформований таким чином, щоб параметр u_1 – витрата гріючої пари – виступав керуючим впливом для об'єкту, а параметр u_2 – витрата оцтової кислоти – відігравав роль збурення. Виходами моделі обрано температуру (y_1) та витрату (y_2) парів оцтової кислоти, який виходить з кип'ятильника. Такий вибір параметрів виходу обумовлений тим, що ці параметри визначають якість роботи об'єкта.

В якості структури математичної моделі обрана модель в просторі станів. Графік відповідності ідентифікованих моделей різних порядків наведено на рис. 11.

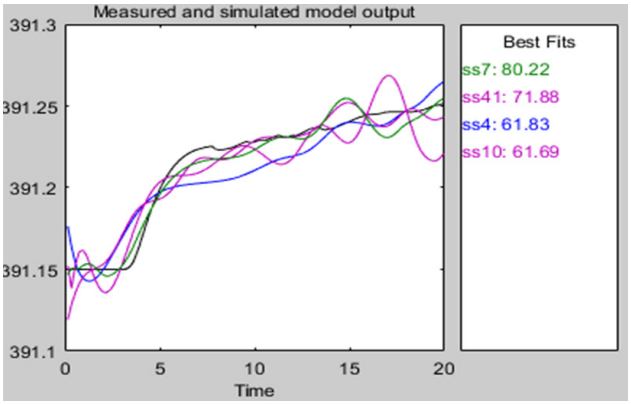


Рис. 11. Графіки відповідності отриманих моделей

З наведеного графіка можна зробити висновок, що найкращі показники якості має модель сьомого порядку. Для задачі синтезу та дослідження системи керування втрати якості моделі не критичні. Перехідні характеристики спрощеної математичної моделі представлені на рис. 12.

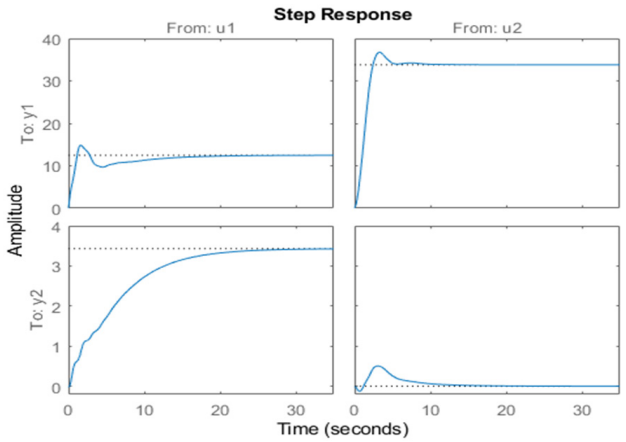


Рис. 12. Перехідні характеристики математичної моделі за каналами регулювання та збурення

Висновки. У статті за допомогою середовища *ANSYS* розроблено високоточну математичну модель технологічного об'єкту керування, а саме кип'ятильника з розподіленими параметрами, на

основі якої здійснювалося дослідження роботи даного об'єкта. Розроблена математична модель дозволила провести дослідження впливу фізико-хімічних процесів на перебіг технологічного процесу. Особливу увагу приділено розподілу парової фракції оцтової кислоти та динаміку випаровування, що є ключовим для забезпечення якості кінцевого продукту.

Враховуючи надмірну складність моделі, а саме значний час моделювання – декілька годин, та необхідні розрахункові можливості, застосування цієї моделі при синтезі системи керування неможливе. Саме тому для задач синтезу системи керування було створено спрощену модель за допомогою ідентифікації даних отриманих з повної математичної моделі. Відтак, спрощена модель зберігає необхідну точність, що складає більше 80%, але є більш придатною для управління процесом у реальному часі – час розрахунку за нею не перевищує секунди.

Список літератури:

1. Жученко А. І., Ситніков О. В., Губар Б. П. Математична модель зовнішнього теплообміну скловарної печі. Київ. *Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки»*. 2022. Том 33 (72). №1. С. 87–90. https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.1/14

2. Жученко Л. К. Система програмного керування процесом випалювання вуглецевих виробів. *Прикладні питання математичного моделювання*. 2023. Т. 6. № 1. С. 46–53. https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2023-6-1-5

3. Sytnikov O., Skladannyy D., Sokolov K. Development of a spray dryer's mathematical model for control tasks. Bulletin of National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» *Series «Chemical Engineering, Ecology and Resource Saving»*. 2023. № 3 (22). 2023. №3(22). С. 52–62. https://doi.org /10.20535/2617-9741.3.2023.288249

4. Кубах С. О., Цапар В. С. Імітаційне моделювання кожухотрубного теплообмінника у нафтогазовій промисловості. *Вісник НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського". Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*. 2023. №3. С. 9–22. https://doi.org/10.20535/2617-9741.3.2023.288245

5. Tadeusz Stolarski, Nakasone Y., Yoshimoto S. Engineering Analysis with ANSYS Software. *Butterworth-Heinemann*. 2018. 562 p.

6. Жученко О. А., Коротинський А. П. Дослідження впливу початкової температури повітря на температурний режим процесу випалювання вуглецевих виробів у камері «під вогнем». *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2018. №36. С. 201–209. https://doi.org/10.31498/2225-6733.36.2018.142550

7. Троханяк В. І., Богдан Ю.О. Застосування методу кінцевих елементів при побудові сітки в Ansys Meshing для CFD моделей. *ДВНЗ "ПДТУ"*. 2015. №30. Т.2. С. 181–189. https://doi.org/10.31498/2225-6733.30.2015.52799

8. Mitkou T., Chrysanidis T. R/C column modeling using ANSYS and loading rate and mesh method influence studies. *In Proceedings of the 8th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*(COMPDYN 2021). 2021. pp. 1063–1084.

9. Kent L. Lawrence. ANSYS Tutorial: Release 14. SDC Publications, 2012. 178 p.

10. Acetic Acid. Compound Summary. PubChem. *An official website of the United States governmen*. URL: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Acetic-Acid (дата звернення 30.10.2024 р.)

11. Кубрак А. І., Ковалюк Д. О., Сполович Р. Ю. Визначення передатних функцій за системою звичайних диференціальних рівнянь у канонічній формі. *Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*. 2016. №1(15). С. 135–140.

12. Жученко А. І., Кваско М. З., Кубрак Н. А. Ідентифікація динамічних характеристик. *Комп'ютерні методи*. Київ: ВІПОЛ. 2000. 182 с.

13. Жученко О. А. Параметрична ідентифікація прогнозувальної моделі у системі керування об'єктів з розподіленими параметрами. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2019. №11(1). С. 13–18. https://doi.org/10.15673/atbp.v11i1.1325

14. Коржик М. В. Моделювання об'єктів та систем керування засобами MatLab. Навч. посібн. для студентів вищих навч. закл. Київ: НТУУ «КПІ». 2016. 174 с.

15. Yaroshchuk L., Tiurina Y. Simulation of the Industrial Oil Adsorption Purification Process for Automation Tasks. *Modelling and Simulation in Engineering*. vol. 2022. https://doi.org/10.1155/2022/2738654

Korotynskyi A.P., Abramova A.O., Skladannyy D.M. **DEVELOPMENT THE RECTIFICATION COLUMN MODEL IN THE ACETIC ACID PRODUCTION AND ITS SIMPLIFICATION FOR CONTROL PROBLEMS**

At this article the problem state analyzes devoted to the development of mathematical models for the purpose of their effective use in automated control systems. More and more authors are paying attention to models that take into account the processes occurring specifics in the modeling objects. For researched processes computer modeling and construction of accurate mathematical models, the ANSYS software package is increasingly used, which uses the finite element method for building meshes in ANSYS Meshing. The object of the research is the boiling process in the cube of the rectification column during the production of acetic acid with the aim of building a simplified mathematical model for use in synthesis and control tasks. The acetic acid production process and its features were analyzed, and it was determined that the quality of the final product is achieved by rectification. Mathematical models for heat transfer and mass transfer of the studying object is built, taking into account the initial conditions. Further modeling of the research object is carried out using the ANSYS software environment. The following initial data are generated for modeling: object geometric description, physical properties of the environment with which it interacts, and modeling initial conditions. A grid model is created, taking into account the necessary parameters, which choice is determined by the type of process under investigation and the computing power of the available equipment. As a mathematical modeling of the evaporation process result in ANSYS, the simulated values distribution fields are constructed and the parameters changes over time are determined. A complex model is obtained, which is not adapted to the control systems synthesis and research tasks. The resulting model needs to be simplified to meet the main requirements: compliance of its behavior with the original model and the ability to quickly calculate the system state. Therefore, the object was identified using the MatLab System Identification Toolbox. Based on the obtained correspondence graphs of the different orders identified models, it is established that the seventh order model gives the best results. On the basis of the selected model, the mathematical model transient characteristics are constructed according to the regulation and disturbance channels.

Key words: *control, mathematical modeling, rectification, evaporation, identification, regulation channel, disturbance channel.*

УДК 622: 647.2: 681.5
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/14

Курганов І.Д.
Криворізький національний університет

Харламенко В.Ю.
Криворізький національний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ПРИВОДНОГО БАРАБАНА СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА ЯК ОБ'ЄКТА УПРАВЛІННЯ СИСТЕМИ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

В роботі запропоновано розглянути фрикційну пару приводний барабан-стрічка, як об'єкт управління, динамічні процеси якого розглядаються в прив'язці до просторових координат.

Керування такого роду об'єктами обумовлюється технологічною необхідністю компенсації робочого ковзання стрічки на приводному барабані конвеєра, в основі якого лежить процес передачі руху за допомогою сил тертя, і реалізується шляхом зміни теплового поля на дузі обхвату за допомогою зміни натягу стрічки конвеєра або швидкості обертання барабана. Тобто вплив на об'єкт розглядається як зосереджений параметр, а вихідний параметр, розподілений у двомірному просторі.

Таким чином, з точки зору теорії керування системами з розподіленими параметрами в процесі керування тепловим полем приводного барабана та стрічки конвеєра, як керована координата виступає температура та її розподіл на дузі обхвату.

Внаслідок фізичних процесів під час керування натягом стрічки змінюється як величина джерела теплового потоку, так і величина поверхні його випромінювання, яка виступає граничними умовами для задачі з розподіленими параметрами.

Для опису системи автоматичного управління з розподіленими параметрами фрикційної пари барабана – стрічка використовується структурне моделювання системи на основі функції Гріна – імпульсної перехідної функції з вхідними та вихідними змінними часу та простору.

За аналогією із зосередженою системою, для якої подібне співвідношення пов'язує зображення входу та виходу за допомогою передавальної функції в об'єктах з розподіленими параметрами передатною функцією є зображення функції Гріна.

Таким чином, передавальна функція як для зосередженої, так і розподіленої системи є зображенням її імпульсної перехідної функції, і характеризує властивості об'єкта.

Наведена структурна модель об'єкта управління, де завдяки оператору Лапласа ураховуються динамічні процеси з розподіленням їх у просторі.

Отримані результати обчислень, які представлені у вигляді цифрового моделювання методом кінцевих елементів за допомогою програми PDE Toolbox математичного пакету MATLAB.

Ключові слова: *стрічковий конвеєр, фрикційна пара, кут робочого ковзання, теплове поле, розподілені параметри.*

Постановка проблеми. Однією з аварійних ситуацій, що найбільш часто зустрічається та призводить до зупинки конвеєрної лінії, є пробуксовування приводної станції одного з стрічкових конвеєрів тракту подачі транспортованої рудної маси. В результаті доводиться зупиняти весь конвеєрний тракт та здійснювати повторний пуск, але вже завантажених конвеєрів. У технологічній експлуатації стрічкових конвеєрів часто виникають ситуації, коли натяг конвеєрної стрічки ослаблений, що викликає збільшення опору руху стрічки. В результаті підвищуються витрати потужності, які споживаються приводною станцією конвеєра і знижується к.к.д. фрикційної пари барабан-стрічка, що збільшує стирання робочих поверхонь стрічки та футерування барабана, а в результаті їх тертя, нагрівання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням питань зміни температури займалися такі автори [1, с. 45; 2, с. 11; 4, с. 5] та ін. В основі питання, що досліджується, закладена теорія розподілу температурного поля в зоні контакту стрічки конвеєра та футерування приводного барабана.

В процесі взаємодії тіл, що труться, у тому числі в парі стрічка-барабан, поширення тепла,

яке утворюється на контакті, описується диференціальним рівнянням теплопровідності Фур'є.

Рівняння теплопровідності є параболічним рівнянням, що характеризують нестаціонарні процеси температурного розподілу.

$$\frac{d\tau 1}{dt} = \zeta\left(\frac{d^2\tau 1}{dR^2} + \frac{1}{R}\cdot\frac{d\tau 1}{dR} + \frac{1}{R^2}\cdot\frac{d^2\tau 1}{d\phi^2} + \frac{d^2\tau 1}{dz^2}\right) + q(t)$$

$$\frac{d\tau 2}{dt} = \zeta\left(\frac{d^2\tau 2}{dR^2} + \frac{1}{R}\cdot\frac{d\tau 2}{dR} + \frac{1}{R^2}\cdot\frac{d^2\tau 2}{d\phi^2} + \frac{d^2\tau 2}{dz^2}\right) + q(t)$$

$$t>0;\ R1\le R\le R2;\ 0\le\varphi\le 2\pi, \qquad (1)$$

де $\tau 2$ – температура стрічки, град; $R1$, $R2$ – внутрішній та зовнішній радіуси барабана, включаючи футерування, м; $R3$ – зовнішній радіус стрічки що огинає барабан, м (див. рис. 1); $q(t)$ – джерело теплового потоку.

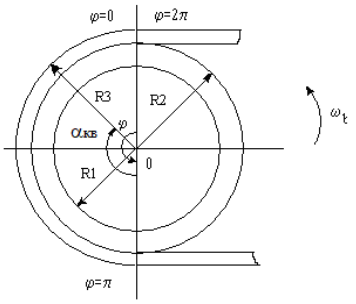


Рис. 1. Фрикційна пара барабан-стрічка конвеєр

З проведених досліджень збільшення дуги робочого ковзання $\alpha_{кв}$ на приводному барабані конвеєра призводить до зниження запасу тягової здатності, що може спричинити аварійне пробуксування [3, с. 4]. При цьому зростає температура в зоні зчеплення стрічки та барабана, яка досягає 300–350°С за 15 хвилин роботи конвеєра [2 с. 12–13]. У випадку робочого ковзання відбуваються втрати енергії, які витрачаються на подолання сил тертя, частина їх викликає зміну температури у зоні контакту барабан – стрічка.

У роботі [4, с. 3] проводилися дослідження температури тертя на контакті стрічка – барабан, методом зняття термограм. Результати показали, що температура на ковзному контакті за зміну (5 годин безперервної роботи) зростає від 79.5 до 127°С.

Постановка завдання. Автором роботи пропонується виконати структурне моделювання фрикційної пари як моделі з розподіленими параметрами для її подальшого використання у розробці оптимальної системи автоматичного управління.

Виклад основного матеріалу. При виборі керуючих впливів, що визначають режим охолодження або нагрівання робочої області фрикційної пари (дуги ковзання), необхідно дотриматися технологічних обмежень на допустиму величину температури робочої області, як вихідна величина виступає безпосередньо температурне поле $\tau 1(R, \varphi, z, t)$ або величина температури у заданій точці простору.

Процес управління будується так, щоб найкращим чином за обраним критерієм оптимальності домогтися найкращого наближення величини теплового джерела до бажаної його величини при дотриманні робочих обмежень на управління та стан об'єкта.

Управління процесом нагрівання або охолодження здійснюється шляхом зміни натягу стрічки та швидкості обертання барабана. Опишемо цю керуючу дію деякими функціями $S(t)$, $v(t)$ які розглядаються в діапазоні наступних обмежень:

$$A_1 \le S(t) \le A_2, \qquad (2)$$

$$0 \le v(t) \le v_{ст},$$

де константи $A1$ та $A2$ відповідають граничним значенням керуючої величини, Н; $v_{ст}$-паспортна швидкість руху стрічки конвеєра, м/с.

Тепер необхідно встановити зв'язок між $\tau 1(t)$ та $S(t)$ або $v(t)$ тобто визначити передатну функцію системи, входом якої є натяг стрічки $S(t)$ або швидкість обертання барабана $v(t)$, а виходом температура нагрівання $\tau\ 1(t)$ на дузі обхвату приводного барабана та стрічки конвеєра при їх фрикційній взаємодії. Як керуючу величину розглянемо тільки натяг стрічки $S(t)$. Для подальшого розгляду можливі принаймні два способи опису цієї передавальної функції. Найпростіший із них полягає в наступному. Вважається, що між входом і виходом системи є лише дві елементарні ланки: ланка запізнювання, що характеризує затримку роботи приводу натяжної станції та довжини конвеєра, і інерційна ланка, що враховує інерційність зростання температури при стрибкоподібній зміні натягу стрічки. При цьому зв'язок між $\tau 1(t)$ та $S(t)$ може бути виражений наступним рівнянням:

$$B\cdot\frac{d\tau 1}{dt} + \tau 1 = k\cdot S(t-\tau), \qquad (3)$$

де τ – час запізнення, B – постійна часу інерційної ланки, k-статичний коефіцієнт передачі. Дане рівняння дає дуже спрощену картину роботи конвеєра, так як натяг стрічки не може змінюватися стрибком, а змінюється під дією вантажу на стрічці та під дією працюючого приводу натяжної станції.

Структурно математичну модель можна показати у наступному вигляді (рис. 2). Натяг стрічки, що змінюється приводом натяжної станції, змінює тягову здатність приводного бара-

бана, що призводить до зміни температури в зоні обхвату дуги фрикційної пари. Сигнал керування $\tau 1(t)$ та сигнал збурення $\alpha_{кв}(t)$ надходять на вхід блоку температурного поля, який представимо у вигляді функції

$$\tau 1(R, \varphi, z, t)=A(\tau 1(t), \alpha_{кв}(t))$$

де A – деякий оператор. Практично цей оператор є в загальному випадку рішенням диференціального рівняння в частинних похідних, яке описує процес теплообміну у фрикційній парі приводний барабан-стрічка. Знаходження оператора для опису динаміки процесу управління в просторових координатах і становить задачу управління.

Реалізація системи автоматичного управління з розподіленими параметрами фрикційної пари барабана – стрічка заснована на структурному моделюванні системи типовими ланками.

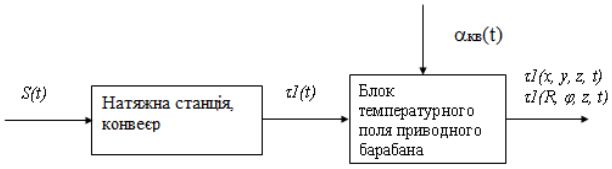


Рис. 2. Структурна схема моделі системи управління

В результаті необхідно структурно представити наступний вираз

$$\tau 1(x,t) = \int_0^t \int_{x_0}^{x_1} G(x,\xi,t-\tau)\cdot w(\xi,\tau)d\xi d\tau\,, \qquad (4)$$

де $G(x,\xi,t-\tau)$ функція Гріна – імпульсна перехідна функція з вхідними та вихідними змінними часу та простору, може бути виражена у вигляді типового об'єкта з розподіленими параметрами, де вхідним впливом виступає функція $w(x, t)$, а виходом $\tau 1(x, t)$, як показано на рис.3а. Аналогічне представлення ланки із зосередженими параметрами, де вхідна і вихідна величина змінюється лише у часі, показано на рис. 3б [6, с. 93]. Однак поняття розподіленого блоку передбачає залежність вхідного та вихідного сигналів ще від просторових змінних.

Для практичного застосування стандартизованої функції вхідного впливу $w(\xi,\tau)$ доцільно її подати у вигляді

$$w(\xi,\tau) = \beta(\xi)\cdot q(\tau)$$

із зосередженим впливом $q(\tau)$ та фіксованими законами $\beta(\xi)$ просторового розподілу вхідного сигналу.

Вираз (4) можна записати у такому вигляді

$$\tau 1(x,t) = \int_0^t \int_{x_0}^{x_1} G(x,\xi,t-\tau)\cdot\beta(\xi)\cdot q(\tau)d\xi d\tau =$$

$$= \int_0^t \left[\int_{x_0}^{x_1} G(x,\xi,t-\tau)\cdot\beta(\xi)d\xi\right]\cdot q(\tau)d\tau = \int_0^t S(x$$

де

$$S(x,t-\tau) = \int_{x_0}^{x_1} G(x,\xi,t-\tau)\cdot\beta(\xi)d\xi\,.$$

В результаті отримаємо типовий х-блок із зосередженим входом та розподіленим виходом, який представлений на рис. 4 [6, с. 93]. Як вхідна зосереджена величина виступає $q(t)$ – джерело теплового потоку, який вважаємо рівномірно розподілений по дузі робочого ковзання $\alpha_{кв}$.

Для подальших досліджень поведінки систем з розподіленими параметрами необхідно використати перетворення Лапласа по змінній часу t до вхід-вихідного співвідношення, що розглядається. Звичайні правила застосування перетворення Лапласа для функцій стану виходу $\tau 1(t)$ зосереджених систем повністю переносяться на розподілені функції стану виходу $\tau 1(x, t)$, де просторова змінна х виступає у ролі "стороннього" параметра.

Використовуючи відоме правило операційного обчислення, згідно з яким зображення L_t по змінній t згортки функцій дорівнює добутку зображень цих функцій, отримаємо, перетворюючи за Лапласом обидві частини виразу (4)

$$L_t(\tau 1(x,t)) = \tau 1'(x,p) = L_t\left[\int_0^t \int_{x_0}^{x_1} G(x,\xi,t-\tau)\cdot w(\xi,\tau)d\xi d\tau\right] =$$

$$= \int_{x_0}^{x_1}\left\{L_t\left[\int_0^t G(x,\xi,t-\tau)\cdot w(\xi,\tau)d\tau\right]\right\}d\xi = \int_{x_0}^{x_1} G'(x,\xi,p)\cdot w'(\xi,p)d\xi \,,$$

де $\tau 1'(x, p)$, $G'(x, \xi, p)$ та $w'(\xi, p)$ – відповідно зображення виходу об'єкта $\tau 1(x, t)$ функція Гріна $G(x, \xi, t)$ та стандартизуючої функції $w(\xi, \tau)$, а p – комплексна змінна перетворення Лапласа.

За аналогією із зосередженою системою, для якої подібне співвідношення пов'язує зображення входу та виходу за допомогою передавальної функції в об'єктах з розподіленими параметрами передатною функцією є зображення функції Гріна

$$W(x,\xi,p) = G'(x,\xi,p).$$

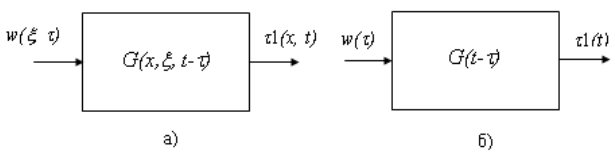


Рис. 3. Структурне представлення лінійного об'єкта управління: а – стаціонарний розподілений блок; б – стаціонарний об'єкт із зосередженими параметрами

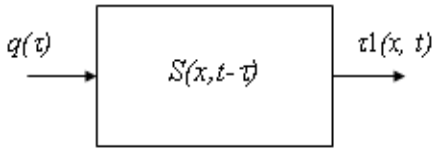


Рис. 4. Структурне представлення розподіленого х-блоку із зосередженим входом та розподіленим виходом

Таким чином, передавальна функція як для зосередженої, так і розподіленої системи є зображенням її імпульсної перехідної функції, і характеризує властивості об'єкта. Однак специфіка розподіленої системи полягає в тому, що замість звичайного добутку передавальної функції та зображення входу тут використовується операція інтегрування за просторовим аргументом входу для отримання зображення функції стану об'єкта, яка надалі має називається просторовою композицією.

В результаті для х-блоку представлення в операторній формі має такий вигляд

$$\tau 1'(x,p)=\int_{x_0}^{x_1} G'(x,\xi,p)\cdot w'(\xi,p)d\xi = v'(p)\int_{x_0}^{x_1} G'(x,\xi,p)\,\beta(\xi)d\xi = S'(x,p)q'(p).$$

Передатна функція для х-блоку може бути представлена у такому вигляді

$$W_x(x,p)=S'(x,p)=\int_{x_0}^{x_1} G'(x,\xi,p)\,\beta(\xi)d\xi=\int_{x_0}^{x_1} W(x,\xi,p)\,\beta(\xi)d\xi .$$

В результаті зображення вихідної величини $\tau 1'(x,\ p)$ x-блоку представляється для кожного фіксованого значення просторової координати x у вигляді добутку

$$\tau 1'(x,p)=W_x(x,p)\cdot q'(p)$$

передавальної функції та зображення вхідного впливу, за аналогією із зосередженими системами.

Таким чином, представлено математичний опис та його структурне подання для одномірних об'єктів з розподіленими параметрами. Досліджуваний об'єкт описується багатовимірною математичною моделлю, де задіяні три просторові змінні і одна змінна часу. При обґрунтуванні цифрового моделювання об'єкта було встановлено, що для отримання теплової картини фрикційної пари приводної барабана – стрічка конвеєра достатньо використовувати двомірний простір.

Реалізувати рішення поставленої задачі необхідно через структурне моделювання на основі типових ланок об'єктів з розподіленими параметрами, як і в об'єктах із зосередженими параметрами. Формуємо математичну модель у двомірному просторі через її одновимірне уявлення. У цьому випадку структурне представлення моделі виражається за допомогою паралельного з'єднання типових ланок, які містять у своєму описі одну просторову змінну.

Нехай нам відомі передатні функції $W_1(x_1,\xi,p)$ та $W_2(x_2,\xi,p)$ двох розподілених блоків, вихідні сигнали яких ,$\tau 1_1'(x,\ p)$ та $\tau 1_2'(x,\ p)$ визначені на просторових областях $D_1 \in x_1$ та $D_2 \in x_2$. При паралельному з'єднанні цих двох блоків із загальним входом $w'(\xi,\ p)$ їх вихідні сигнали складаються в кожній точці $x \in D$ просторової області D, на якій визначена ця сума $\tau 1'(x,\ p)$, що розглядається як вихід цього з'єднання , і отже, $D = D_1 \cap D_2$ є перетином D_1 та D_2.

В результаті якщо $D_1 = D_2$ то $D= D_1 = D_2$ і можна уявити що $x= x_1= x_2$, а вихідний сигнал дорівнює

$$\tau 1'(x,p)=\tau 1_1'(x_1,p)+\tau 1_2'(x_2,p)=\int_{x_0}^{x_1} G_1'(x_1,\xi,p)\cdot w'(\xi,p)d\xi+\int_{x_0}^{x_1} G_2'(x_2,\xi,p)\cdot w'(\xi,p)d\xi=$$
$$=\int_{x_0}^{x_1}\left[G_1'(x_1,\xi,p)+G_2'(x_2,\xi,p)\right]\cdot w'(\xi,p)d\xi=\left[G_1'(x_1,\xi,p)+G_2'(x_2,\xi,p)\right]\otimes w'(\xi,p)=$$
$$=\left[W_1(x_1,\xi,p)+W_2(x_2,\xi,p)\right]\otimes w'(\xi,p)=W'(x,\xi,p)\otimes w'(\xi,p)$$

де

$$W(x,\xi,p)=W_1(x_1,\xi,p)+W_2(x_2,\xi,p);$$

$$x_1 \in D_1;\ x_2 \in D_2;\ x=(x_1,x_2),\ x \in D = D_1 \cap D_2.$$

Таким чином, реакція системи з розподіленими параметрами на вхідний вплив виражається добутком у вигляді просторової композиції

$$\tau 1'(x,\xi,p)=W'(x,\xi,p)\otimes w'(\xi,p).$$

Така сама методика використовується для подання багатовимірних областей через типові блоки, що описують одновимірні об'єкти.

Рівняння теплопровідності, яким описується об'єкт, що досліджується (1) представлено в наступному вигляді

$$\frac{d\tau 1(x,y,t)}{dt}=\zeta\left(\frac{d^2\tau 1(x,y,t)}{dx^2}+\frac{d^2\tau 1(x,y,t)}{dy^2}\right),$$

з нульовими початковими та граничними умовами. На основі вищевикладеної методики теплове поле $\tau 1(x, y, t)$ представляємо у вигляді суми

$$\tau 1(x,y,t)=\tau 1_1(x,t)+\tau 1_2(y,t)$$

одновимірних температурних полів $\tau 1_1(x,\ t)$ і $\tau 1_2(y,\ t)$.

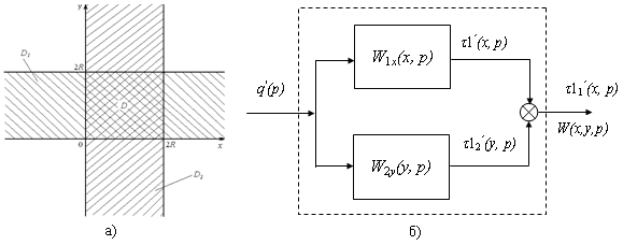


Рис. 5. Структурне представлення двовимірного температурного поля

В результаті рівняння, що описує двовимірну область, перетворюється на систему одновимірних рівнянь з початковими та граничними умовами по кожній координаті окремо.

У такому випадку об'єкт при керуванні внутрішнім джерелом теплового потоку $q(t)$ можна розглядати як паралельне з'єднання розподілених x-блоків із загальним зосередженим входом q(t) та передатними функціями $W_{1x}(x, \mathrm{I})$ и $W_{2y}(y, p)$.

$$\begin{cases} \dfrac{d\tau 1(x,t)}{dt} = \zeta\left(\dfrac{d^2\tau 1(x,t)}{dx^2}\right) \\ \dfrac{d\tau 1(y,t)}{dt} = \zeta\left(\dfrac{d^2\tau 1(y,t)}{dy^2}\right) \end{cases}$$

Передатна функція $W(x,y,p)$ визначається тепер сумою

$$W(x, y, p) = W_{1x}(x, p) + W_{2y}(y, p)\ .$$

$$x \in D_1; y \in D_2; D = D_1 \cap D_2$$

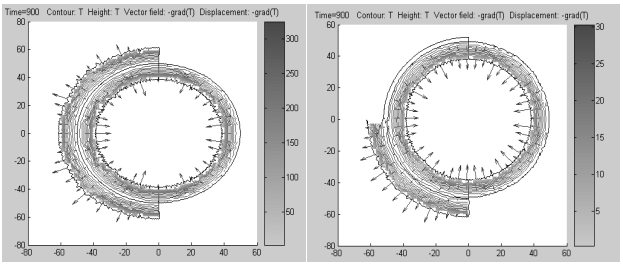
де області D_1 та D_2 являють собою одновимірні області, що становлять єдину двомірну область D, як представлено на рис. 5а.

Структурне представлення двомірної моделі з розподіленими параметрами на основі паралельного з'єднання типових одновимірних блоків показано на рис. 5б.

Таким чином, модель, яка відображає динамічні властивості об'єкта, що досліджується, представлена у вигляді паралельного з'єднання типових блоків з передатними функціями $W_{1x}(x, p)$ и $W_{2y}(y, p)$. Кожен із блоків представляється паралельним з'єднанням однієї інтегруючої ланки та нескінченного числа аперіодичних ланок при аналітичному методі вирішення задачі з розподіленими параметрами [6, с. 94].

На цьому етапі розглянуто тільки структурне моделювання розподілу температурного поля на приводному барабані. Для структурного моделювання фрикційної пари приводного барабана – стрічка конвеєра (1) необхідно також виконати структурний опис теплового поля стрічки.

Так як температурний розподіл фрикційної пари описується системою двох однотипних рівнянь теплопровідності, які відрізняються тільки початковими та граничними умовами, структурна модель температурного поля стрічки конвеєра на приводному барабані аналогічна моделі приводного барабана (див. рис. 5б). В результаті структурна модель фрикційної пари приводний барабан – стрічка конвеєра має один вхідний вплив та два виходи. Як вхідний вплив виступає внутрішнє джерело теплового потоку. Вихідними сигналами системи прийняті температурні поля приводного барабана $\tau 1(x, y, t)$ та аналогічно для стрічки конвеєра $\tau 2(x, y, t)$, яка взаємодіє з приводним барабаном на дузі обхвату. Значення температур, одержуваних на виходах системи, відобразимо у вигляді теплового поля, яке для аварійного режиму роботи приводу конвеєра представлене на рис.6а. Розподіл температури на фрикційній парі приводний барабан – стрічка при сталому режимі роботи конвеєра показано на рис. 6б.



а) б)

Рис. 6. Розподіл температури у двомірній просторовій площині: а) при аварійному пробуксуванні; б) при встановленому режимі роботи конвеєра за його максимальної тягової здатності

Висновки. В результаті отримано структурну схему моделі з розподіленими параметрами, на основі якої визначається розподіл теплового поля фрикційної пари барабан-стрічка конвеєра. Отриманий результат дозволяє сформувати величину завдання для виконання поточного управління натягом стрічки чи швидкістю її руху, залежно від контрольованої температури у зоні фрикційного взаємодії, а точніше від швидкості її зростання. Результати обчислень представлені у вигляді цифрового моделювання методом кінцевих елементів за допомогою програми PDE Toolbox математичного пакету MATLAB.

Список літератури:

1. Błażej R, Sawicki M, Konieczna M, Kozłowski T, Kirjanów A. Automatic analysis of themrograms as a means for estimating technical of a gear system, Diagnostyka. 2016;17(2):43-48

2. Dabek, P.; Szrek, J.; Zimroz, R.; Wodecki, J. An Automatic Procedure for Overheated Idler Detection in Belt Conveyors Using Fusion of Infrared and RGB Images Acquired during UGV Robot Inspection. Energies 2022, 15, 601. https://doi.org/10.3390/en15020601

3. Hrabovský, L.; Neniˇcka, P.; Fries, J. Laboratory Machine Verification of Force Transmission Provided by Friction Acting on the Drive Drum of a Conveyor Belt. Machines. 2023. 11. Pp 1-19. https:// doi.org/10.3390/machines11050544

4. Siami, M.; Barszcz, T.; Wodecki, J.; Zimroz, R. Automated Identification of Overheated Belt Conveyor Idlers in Thermal Images with Complex Backgrounds Using Binary Classification with CNN. Sensors 2022. 22, 10004. https:// doi.org/10.3390/s222410004

5. Szurgacz, D.; Zhironkin, S.; Vöth, S.; Pokorný, J.; Spearing, A.J.S.; Cehlár, M.; Stempniak, M.; Sobik, L. Thermal Imaging Study to Determine the Operational Condition of a Conveyor Belt Drive System Structure. Energies 2021. 14, P. 163-180. https://doi.org/10.3390/en14113258

6. Кірстен А. Moppic Controller Design for Distributed Parameter Systems. Springer Cham. 2020. P. 287. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34949-3

Kurganov I.D., Kharlamenko V.Yu. MODELING OF THE DRIVE DRUM OF A BELT CONVEYOR AS A CONTROL OBJECT OF A SYSTEM WITH DISTRIBUTED PARAMETERS

The paper proposes to consider the friction pair of the drive drum-belt as a control object, the dynamic processes of which are considered in relation to spatial coordinates.

Control of such objects is determined by the technological necessity of compensating for the working slip of the belt on the drive drum of the conveyor, which is based on the process of transmitting motion using friction forces, and is implemented by changing the thermal field on the arc of the girth by changing the tension of the conveyor belt or the speed of rotation of the drum. That is, the impact on the object is considered as a concentrated parameter, and the output parameter is distributed in two-dimensional space.

Thus, from the point of view of the theory of control of systems with distributed parameters in the process of controlling the thermal field of the drive drum and the conveyor belt, the temperature and its distribution on the arc of the circumference act as the controlled coordinate.

As a result of physical processes during belt tension control, both the magnitude of the heat flux source and the magnitude of its radiation surface change, which act as boundary conditions for the problem with distributed parameters.

To describe the automatic control system with distributed parameters of the friction pair of the drum – tape, structural modeling of the system based on the Green's function is used – an impulse transition function with input and output variables of time and space.

By analogy with a lumped system, for which a similar relation connects the input and output images using a transfer function, in objects with distributed parameters the transfer function is the image of the Green's function.

Thus, the transfer function for both a centralized and distributed system is a representation of its impulse transition function and characterizes the properties of the object.

A structural model of the control object is presented, where dynamic processes with their distribution in space are taken into account thanks to the Laplace operator.

The results of the calculations are obtained, which are presented in the form of digital modeling by the finite element method using the PDE Toolbox program of the MATLAB mathematical package.

Key words: *belt conveyor, friction pair, working slip angle, thermal field, distribted parameters.*

УДК 004.58
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/15

Лобанчикова Н.М.
Державний університет «Житомирська політехніка»

Лисенко М.С.
Державний університет «Житомирська політехніка»

АНАЛІЗ СТАНУ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МАЛОМОБІЛЬНИХ ГРУП НАСЕЛЕННЯ ВІРТУАЛЬНИМ СУПРОВОДОМ В МЕДИЧНИХ ЗАКЛАДАХ

У статті здійснено комплексний аналіз поняття «маломобільні групи населення» та досліджено специфічні потреби осіб, що належать до цієї категорії. Проведено детальний аналіз сучасних тенденцій інвалідності в Україні та виявлено основні чинники, що впливають на її динаміку. Серед головних причин визначено бойові дії, терористичні атаки на цивільну інфраструктуру, які призводять до значного збільшення кількості осіб з інвалідністю. Соціально-економічна ситуація, старіння населення, психосоціальні чинники, зокрема стрес та емоційне вигорання, а також обмежений доступ до якісної медичної допомоги, є додатковими факторами, що ускладнюють ситуацію з інвалідністю в країні.

У статті також розглянуто сучасний стан цифровізації системи охорони здоров'я України. Проведено аналіз впровадження медичних інформаційних систем, визначено їх функціональні можливості та окреслено переваги і недоліки використання таких систем у медичних закладах. Зокрема, цифровізація надає можливість оперативного доступу до медичних даних, підвищує точність діагностики та скорочує час, необхідний для надання медичної допомоги. Водночас виявлено певні недоліки, пов'язані з фінансовими витратами на розробку та впровадження систем, а також з потребою у навчанні медичного персоналу для роботи з новими технологіями.

Окрему увагу приділено перспективним напрямкам подальшої цифровізації медичної галузі. Проведений аналіз показав, що в сучасних медичних інформаційних системах і медичних закладах загалом відсутні інтегровані системи навігації та віртуального супроводу, призначені для підтримки маломобільних груп населення. Це створює додаткові труднощі для осіб з обмеженою мобільністю при взаємодії з медичними закладами та отриманні медичної допомоги. Автори підкреслюють, що створення таких рішень є важливим кроком для забезпечення інклюзивності та доступності медичних послуг для всіх груп населення, особливо для осіб з інвалідністю та маломобільних пацієнтів.

Ключові слова: *віртуальний супровід, доповнена реальність інклюзивність, інформаційна технологія, маломобільні групи населення, медична інформаційна система, медичні заклади.*

Постановка проблеми. Організація національної політики, яка повною мірою враховує потреби найменш захищених та найбільш вразливих груп населення, є показником рівня цивілізованості країни. Світова практика підтверджує важливість соціальної інтеграції та захисту прав людей з інвалідністю: у 2006 році Генеральна Асамблея ООН прийняла Конвенцію про права людей з інвалідністю, яка встановлює основні принципи, що гарантують права людей з інвалідністю в різних сферах життя. Ратифікувавши Конвенцію [3], Україна взяла на себе зобов'язання створити умови для повної інтеграції людей з інвалідністю в усі сфери суспільного життя. В рамках цієї ініціативи 14 квітня 2021 року Кабінет Міністрів України видав розпорядження №366-р «Про схвалення Національної стратегії зі створення безбар'єрного простору в Україні на період до 2030 року» [8]. Ця стратегія встановлює нові стандарти доступності та інклюзивності публічних просторів.

У зв'язку зі збільшенням кількості людей з особливими потребами, як внаслідок травм, так і з інших причин, зокрема поранень, необхідно шукати нові рішення для покращення процесу надання послуг медичними установами. Одним з таких напрямків може стати впровадження програмних продуктів з використанням інформаційної технології доповненої реальності. Важливо знайти моделі, методи та технології розробки програмного забезпечення для реалізації віртуального супроводу, тобто портативних навігаційних асистентів для пошуку оптимального шляху до місця призначення пацієнта.

Доповнена реальність – це інформаційна технологія, яка дозволяє використовувати комп'ютери

для створення та сприйняття елементів, які не існують у природному полі зору людини. Реалізація таких завдань базується на використанні різних алгоритмів, які визначають положення пристроїв і користувачів у процесі реконструкції тривимірної сцени, до якої додані віртуальні об'єкти.

Виходячи з вищевикладеного, актуальним є знайдення нових моделей, методів і технології створення програмного забезпечення для віртуального супроводу в закладах охорони здоров'я з метою підвищення рівня цифровізації та надання медичних послуг.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Станом на 1 січня 2021 року в Україні Налічувалося 2,703 млн осіб з інвалідністю, з яких 2,223 млн мали I групу інвалідності, 900,8 тис. – II групу, 1416,0 тис. – III групу та 163,9 тис дітей з інвалідністю. Внаслідок повномасштабного вторгнення кількість людей з інвалідністю в Україні за 18 місяців зросла на 300 тис. [10] [22].

Всеукраїнське громадське об’єднання «Національна Асамблея людей з інвалідністю України» провела опитування серед осіб з інвалідністю, законних представників дітей з інвалідністю (до 18 років), а також осіб з інвалідністю, визнаних недієздатними. Опитування стосувалося доступу до реабілітаційних послуг, забезпечення медичними виробами та/або допоміжними засобами реабілітації в Україні. Опитування проводилося в період з 10 по 30 травня 2023 року за допомогою анкетування респондентів, здійснюваного через платформу Google Форми [1]. Дане дослідження виявило наступні фізичні та комунікаційні бар'єри:

– Існуючі реабілітаційні установи не були достатньо доступними для людей з інвалідністю. На входах не передбачено пандусів або підйомників, а також відсутні безбар'єрні ліфти. Крім того, в установах не передбачено просте у використанні медичне та реабілітаційне обладнання для людей з інвалідністю, а також відсутні чіткі вказівники для людей з вадами зору, розумовими або психічними розладами.

– Основним бар'єром у доступі до реабілітаційних послуг для людей з порушеннями слуху є обмежена кількість перекладачів жестової мови.

– Інформація про надання реабілітаційних послуг у доступних форматах недостатньо.

Варто зазначити, що люди з інвалідністю є лише частиною більш широкого поняття маломобільних груп населення (МГН). До маломобільних груп належать люди, які мають труднощі з самостійним пересуванням, доступом до послуг, отриманням необхідної інформації та переміщенням у просторі [2]. До МГН належать:

– люди з інвалідністю;

– люди з постійними та/або тимчасовими функціональними порушеннями;

– вагітні жінки,

– люди поважного віку;

– люди, які отримали тимчасову травму або хворють;

– люди з нестандартними розмірами тіла;

– люди з дитячими візками ті інші.

Ці люди (рис. 1) мають суттєво обмежену мобільність. Під мобільністю слід розуміти здатність вільно пересуватися без сторонньої допомоги.

При проектуванні доступних об'єктів для маломобільних груп населення необхідно забезпечити своєчасне отримання повної та якісної інформації, що забезпечує доступність для вільного пересування в межах об'єктів відвідування, будівель і споруд, безпеку маршрутів пересування та місць проживання, обслуговування і роботи, переміщення у просторі, користування обладнанням (у тому числі засобами самообслуговування), отримання послуг та участь у трудовому і навчальному процесі; а також забезпечити зручність та комфортність середовища життєдіяльності [7].

Рис. 1. Маломобільні групи населення [12]

Постановка завдання. Метою даної публікації є аналіз стану цифровізації системи охорони здоров’я, ціллю якого є встановлення наявності програмного забезпечення для віртуального супроводу пацієнтів (портативних асистентів) та попиту на нього.

Виклад основного матеріалу. Питання діджиталізації в Україні набуло особливої акту-

альності в умовах пандемії COVID-19 та повномасштабного російського вторгнення. Протягом останніх років діджиталізація української системи охорони здоров'я інтенсивно просувається вперед, демонструючи позитивні результати [11] [13–15]. Впровадження цифрових медичних технологій дозволило пацієнтам відвідувати різні медичні заклади, не боячись, що лікарі не знатимуть їхню історію хвороби та результати аналізів, а також допомогло скоротити час перебування в медичних установах.

Цифровізація системи охорони здоров'я в Україні характеризується як досягненнями, так і викликами. До позитивних досягнень можна віднести впровадження системи eHealth та її постійну підтримку на національному рівні, запровадження електронних рецептів, лікарняних листів, реєстрації новонароджених, а також розробку численних медичних інформаційних систем і стандартів лікування. Значна частина медичного обладнання вже інтегрована з цифровими інтерфейсами для збору, обробки та передачі інформації. Також активно використовуються технології дистанційної освіти та телемедицини.

Однак є й суттєві недоліки. Основною проблемою є відсутність взаємодії між усіма медичними інформаційними системами в Україні та відсутність єдиної інтегрованої платформи, яка б об'єднувала різні рівні медичних організацій та страхових компаній. Крім того, єдина електронна база даних використовується не всіма медичними організаціями та установами, що надають медичні послуги. Використання інтелектуальних технологій для управління, діагностики та пошуку найкращих протоколів лікування залишається обмеженим. Відсутність способу кількісної оцінки пацієнтів в індивідуальному порядку ускладнює обґрунтування найбільш ефективних протоколів лікування. Автоматизація процесів у закладах охорони здоров'я не є пацієнтоорієнтованою, оскільки зосереджена, переважно, на статистичній обробці даних та звітності, а такі медичні інформаційні системи призначені лише для користування лікарями.

Серед найближчих перспектив цифровізації медицини в Україні можна виділити наступні напрями розвитку [13]:

– стандартизація зберігання великих обсягів медичних даних;

– розвиток інформаційних технологій для аналізу медичних даних;

– запровадження COVID-сертифікатів для осіб, які пройшли вакцинацію за кордоном;

– реімбурсація імуносупресивних препаратів;

– запровадження можливості класифікації пацієнтів на основі наявних медичних показань;

– оновлення процесу видачі свідоцтв про народження та листків тимчасової непрацездатності;

– інтеграція електронної системи охорони здоров'я з іншими національними реєстрами для підвищення якості даних;

– додавання генетичної інформації;

– розширення доступу до медичної інформації в онлайн-форматі;

– впровадження електронних медичних записів у стаціонарному лікуванні;

– можливість аналізу впливу лікарських засобів та визначення індивідуального профілю ризику пацієнтів;

– запуск MVP-версії реєстрації персоналу, відповідального за введення медичних виробів, медичних виробів, які імплантують, та медичних виробів для діагностики in vitro;

– розвиток телемедичних рішень в умовах воєнного стану в Україні;

– Інтеграція елементів реабілітації в електронні системи охорони здоров'я.

Найбільша ІТ-система України та один з ключових компонентів цифрової охорони здоров'я – це електронна система охорони здоров'я (ЕСОЗ). Наразі ЕСОЗ пропонує наступні можливості:

– електронні направлення;

– електронні рецепти на рецептурні ліки;

– видача свідоцтв про народження та листків тимчасової непрацездатності;

– програми реімбурсації для отримання ліків та тест-смужок для глюкометрів;

– можливість запису на реабілітаційні заходи.

Крім того, розпочато пілотний проект електронної системи управління запасами лікарських засобів та медичного обладнання “e-Stock” [18], розширено систему “MedData” [21] модулями гуманітарної допомоги, вакцинації та бухгалтерського обліку.

Аналіз захворюваності та інвалідності в Україні з 2017 по 2021 рік, до повномасштабного військового вторгнення російської федерації, виявив зростання первинної захворюваності, поширеності хвороб та інвалідності серед населення працездатного віку. Водночас кількість учасників бойових дій, визнаних інвалідами, мала тенденцію до зниження, що стало наслідком запровадження режиму припинення вогню у 2020 році.

Збільшення кількості осіб з інвалідністю в Україні є результатом складного поєднання соціально-

економічних, політичних та медичних факторів: у 2021 році Україні налічувалося приблизно 2,79 млн осіб з інвалідністю, що відповідає 6% від загальної кількості населення. Значна частка вперше виявлених осіб з інвалідністю – особи працездатного віку, причому найбільшу частку становлять особи з інвалідністю від загального захворювання (47,8%), далі йдуть особи з інвалідністю внаслідок війни (9,8%), з інвалідністю з дитинства (8,1%) та з інвалідністю внаслідок професійних захворювань і нещасних випадків на виробництві (4,3%), рис. 2 [9].

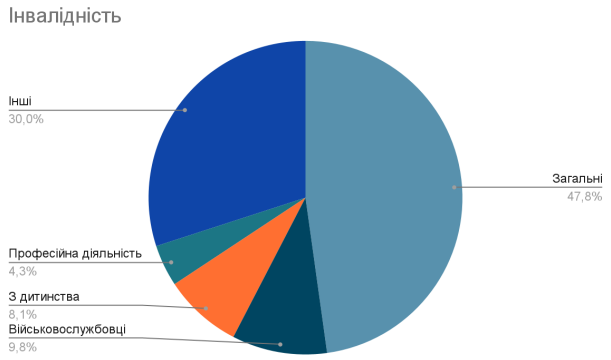


Рис. 2. Причини інвалідності станом на 2021 р.

Найпоширенішими причинами первинної інвалідності серед населення працездатного віку є хвороби системи кровообігу, новоутворення та хвороби нервової системи. З початку повномасштабного вторгнення спостерігається зростання кількості поранень військовослужбовців внаслідок бойових дій та терористичних актів. Хоча підрахувати такі травми складно, існує значна кількість постраждалих, які потребують реабілітації [6].

Зокрема, рівень інвалідності серед населення працездатного віку зменшився на 12,9% порівняно з попереднім роком і становив 43,2 на 10 тис. населення працездатного віку у 2020 році. Основні причини інвалідності в цій групі населення пов'язані з онкологічними, серцево-судинними захворюваннями та хворобами кістково-м'язової системи і сполучної тканини. Однак з початком повномасштабних бойових дій кількість людей з інвалідністю стрімко зросла. За два повоєнні роки їхня кількість збільшилася на 300 тис. і наразі перевищує 3 мільйони.

Отже, основними факторами, що впливають на динаміку інвалідності в Україні на сьогоднішній день, є передусім бойові дії та терористичні атаки на цивільну інфраструктуру, соціально-економічна ситуація, старіння населення, психосоціальні чинники та обмежений доступ до якісної медичної допомоги. Значну роль відіграють також травми, отримані внаслідок нещасних випадків і конфліктів, а також серйозні захворювання, які без належного лікування можуть призвести до постійної втрати працездатності [16].

Проведемо аналіз медичних інформаційних систем з метою визначення наявності модулів для віртуальної навігації. Розглянемо інтерфейс медичної інформаційної системи EMCImed, рис. 3.

Як видно з рис. 3 до функціональних модулів МІС входять: поліклініка, реєстратура, управління персоналом, управління організацією, управління партнерськими відносинами, стаціонар, лабораторія, медичні послуги, управління запасами, статистика, архів зображень. також слід зазначити, що система передбачає включення додаткових платних модулів, що дозволяють створювати унікальні запити до бази і видавати специфічні форми звітів [19].

До переваг даної МІС слід віднести можливість підключення до eHealth, інтуїтивний інтерфейс програмного продукту, відповідає вимогам кіберзахисту та НД ТЗІ.

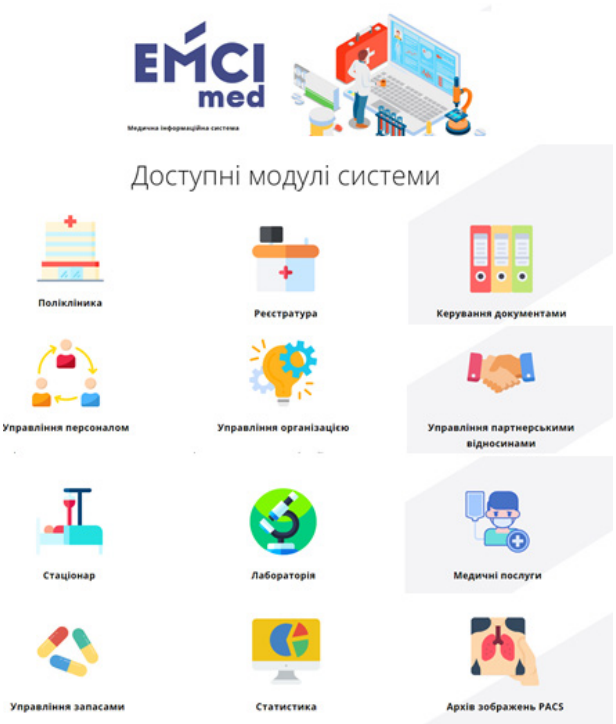


Рис. 3. Функціонал МІС EMCImed

Далі розглянемо можливості медичної інформаційної системи Clinica WEB, рис. 4. Дана МІС пропонує наступні послуги: реєстратура, кабінет лікаря, кабінет пацієнта, інтеграції, фінанси та бухгалтерія, сховище даних. Послуги в свою чергу включають в себе різноманітні модулі. Наприклад,

послуга реєстратура надає користувачу доступ до наступних модулів: «Графік прийому», «Список пацієнтів», «Попередній запис», «Інформування», “Call-center”, «Каса». Також Clinica WEB пропонує специфічні рішення у вигляді комплексних інформаційних систем, а саме «Медична лабораторія», «Діагностичні центри», «Офтальмологія» [4].

Перевагами даної МІС є підключення до eHealth, інтуїтивно зрозумілий веб-інтерфейс, сертифікація КСЗІ та можливість розробки індивідуальних рішень.

Розглянемо медичну інформаційну систему Doctor Eleks. Як видно з рис. 5, дана система пропонує різні модулі та рішення під індивідуальні потреби клієнта в залежності від типу медичного закладу – аптеки, великої приватної клініки, медичного кабінету або комунального медичного закладу. Система також пропонує наступні веб та мобільні рішення, а саме рішення для роботи зі страховими компаніями, кабінет лікаря, кабінет пацієнта, функціонал онлайн консультацій, швидка допомога на планшетах, модуль медичного реєстратора. Модулі, які пропонуються медичним закладам: робота з програмами реімбурсації eHealth, відпуск ліків за електронними рецептами, підписання електронних рецептів КЕП та ключами на захищених носіях; інтеграції з «Дія», платіжними системами, “Doc.ua”; модулі «Діагностичне обладнання», «Лабораторні аналізатори», «Зовнішні лабораторії» [17].

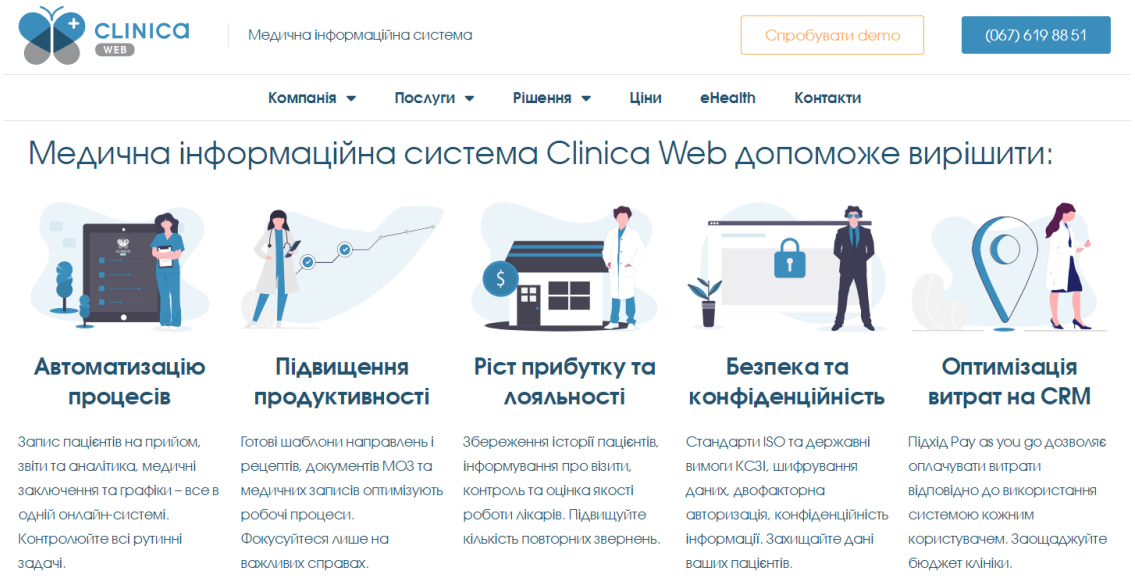


Рис. 4. МІС Clinica WEB

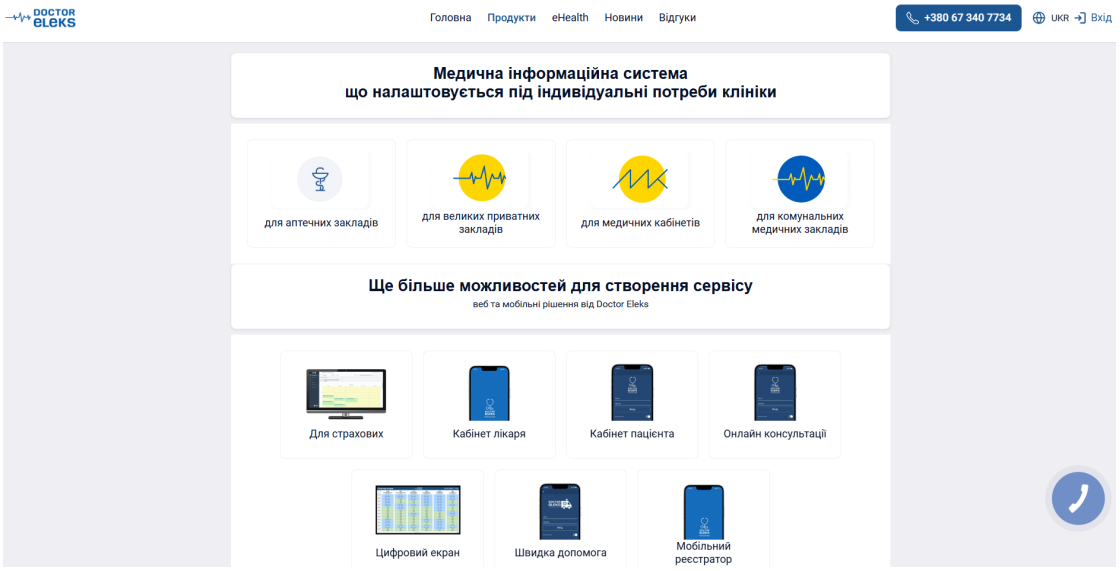


Рис. 5. МІС Doctor Eleks

Перевагами даної МІС є підключення до eHealth, специфікація під індивідуальні потреби клієнта, широкий спектр інтеграцій с зовнішніми системами, розробка веб та мобільних додатків.

Розглянемо медичну інформаційну систему EvoMIS, рис. 6. Дана система пропонує наступний функціонал: модуль eHealth, модуль онлайн-запису «Поліклініка без черг», модуль «Телемедицина», модуль «Діагностика». Також у розробці знаходяться наступні модулі: «Фінанси», «Склад», «Кадри», а також мобільний додаток для лікарів [5].

З переваг можна виділити зручний інтерфейс та забезпечення додатковим обладнанням – термінали для запису до лікарів та монітори з інтерактивним розкладом лікарів. З недоліків варто зазначити невеликий функціонал, частина його знаходиться ще в розробці, та непрозора цінова політика.

Розглянемо медичну інформаційну систему iClinic, рис. 7. Дана система має наступні можливості: збереження даних в хмарному сховищі на серверах в Німеччині; захист передачі даних та гнучкі налаштування доступу для персоналу; доступ до системи як з комп'ютера, так і з мобільних пристроїв; автоматичне заповнення медичної документації; фінансові модулі; спеціалізований стоматологічний модуль «Зубна формула» [20].

До переваг даної МІС можна віднести наступне: прозора цінова політика; можливість збирання додаткової медичної інформації, яка не передбачена системою, за допомогою конструктора форми анамнезу; можливість безоплатної роз-

Рис. 6. EvoMIS

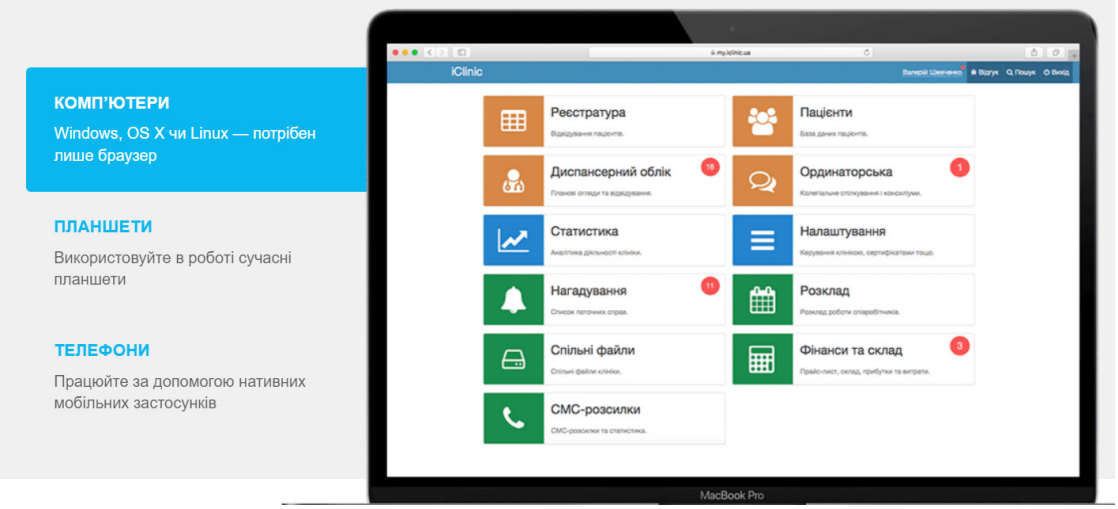


Рис. 7. Інтерфейс iClinic

робки додаткових функцій, за умови їх корисності для інших клієнтів МІС; зручний імпорт даних про пацієнтів у систему при переході з іншої МІС; підтримка різних мобільних платформ.

Аналіз програмних модулів та окремих програм, що використовуються у сфері охорони здоров'я України, зокрема ретельний аналіз медичних інформаційних систем EMCImed, Clinica WEB, Doctor Eleks, EvoMIS та iClinic свідчить про відсутність додатків для віртуального супроводу пацієнтів, що підтверджується дослідженнями, проведеними Всеукраїнським громадським об'єднанням «Національна Асамблея людей з інвалідністю України». Забезпечення повного фізичного супроводу всіх пацієнтів, які потребують фізичної підтримки, залишається складним завданням і вимагає значних трудовитрат.

Тому важливо знайти нові інформаційні технології побудови програмного забезпечення для віртуального супроводу пацієнтів.

Висновки. Висновки дослідження підтвердили, що в сучасній системі охорони здоров'я існує потреба у впровадженні програмного забезпечення для віртуального супроводу пацієнтів, зокрема за допомогою портативних асистентів на базі технології доповненої реальності. Аналіз стану цифровізації медичних інформаційних систем показав відсутність подібних рішень, що могло б значно полегшити взаємодію пацієнтів із системою охорони здоров'я та підвищити рівень їх підтримки. Враховуючи збільшення кількості осіб з інвалідністю внаслідок бойових дій і зростаюче навантаження на медичні установи, розробка та впровадження системи віртуального супроводу є надзвичайно актуальною. Це сприятиме підвищенню доступності медичних послуг та ефективності реабілітації, зменшивши навантаження на медичний персонал і удосконалить процес медичного обслуговування пацієнтів.

Список літератури:

1. Аналітичний звіт щодо отримання дорослими та дітьми з інвалідністю реабілітаційних послуг / Національна Асамблея людей з інвалідністю України 2023. 32 с. URL: https://naiu.org.ua/wp-content/uploads/2023/07/2023_NAIU_AnaliticalReport-Rehabilitation_v02-1.pdf (дата звернення: 29.09.2024).

2. ДБН В.2.2-40:2018. Будинки і споруди. Інклюзивність будівель і споруд. Основні положення. 2018. 64 с. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/dbn_v_2_2_40/1-1-0-1832 (дата звернення: 17.09.2024)

3. Конвенція про права осіб з інвалідністю (Конвенція про права інвалідів) : Конвенція Організації Об'єднаних Націй від 13 грудня 2006 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_g71#Text (дата звернення: 29.09.2024).

4. Медична інформаційна система Clinica Web. URL: https://www.clinica-web.ua/ (дата звернення: 22.09.2024).

5. Медична інформаційна система EvoMIS. URL: https://evomis.com/ (дата звернення: 22.09.2024).

6. Основні показники інвалідності та діяльності медико-соціальних експертних комісій україни за 2021 рік. / за ред. Р.Я. Перепеличної. Дніпро, 2022 URL: https://drive.google.com/file/d/1OCrdYXDxrbSV2aqfbZjZJNedCe5VT4qK/view (дата звернення: 20.09.2024)

7. Про регулювання містобудівної діяльності : Закон України від 17 лютого 2011 р. № 3038-VI / Верховна рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17#Text (дата звернення: 29.09.2024).

8. Про схвалення Національної стратегії із створення безбар'єрного простору в Україні на період до 2030 року / Розпорядження Кабінету Міністрів України від 14 квітня 2021 р. № 366-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/366-2021-р#Text (дата звернення: 29.09.2024).

9. Соціальний захист населення України 2021: стат. зб. / Державна служба статистики України. Київ, 2022. 129 с.

10. Танасишин у штаб-квартирі ООН: В Україні понад 3 млн людей з інвалідністю – це люди з величезним потенціалом, навичками, ідеями, силою. *Міністерство соціальної політики України*. 13 червня 2024 р. URL: https://www.msp.gov.ua/news/23795.html (дата звернення: 29.09.2024).

11. У МОЗ розповіли, які існують цифрові сервіси для пацієнтів – Юридична Газета. *Юридична газета – онлайн версія*. 16 квітня 2024 р. URL: https://yur-gazeta.com/golovna/u-moz-rozpovili-yaki-isnuyut-cifrovi-servisi-dlya-pacientiv.html (дата звернення: 29.09.2024).

12. Хто такі маломобільні групи населення і чому безбар'єрність стосується кожного (інфографіка). *Донецька Обласна Державна адміністрація*. 23 червня 2021 р. URL: https://dn.gov.ua/news/hto-taki-malomobilni-grupi-naselennya-i-chomu-bezbaryernist-stosuyetsya-kozhnogo-infografika (дата звернення: 26.09.2024).

13. Цифрова трансформація охорони здоров'я. *Міністерство охорони здоров'я України*. 11 квітня 2024 р. URL: https://moz.gov.ua/uk/cifrova-transformaciya-ohoroni-zdorov-ya-2 (дата звернення: 29.09.2024).

14. Цифровізація сфери охорони здоров'я – проміжні підсумки 2023 року. *Міністерство охорони здоров'я України*. 10 серпня 2023 р. URL: https://moz.gov.ua/uk/cifrovizacija-sferi-ohoroni-zdorov'ja-–-promizhni-pidsumki-2023-roku- (дата звернення: 29.09.2024).

15. Цифровізація охорони здоров'я у 2024 році – які сервіси будуть впроваджені. *Кабінет Міністрів України*. 21 січня 2024 р. URL: https://www.kmu.gov.ua/news/tsyfrovizatsiia-okhorony-zdorovia-u-2024-rotsi-iaki-servisy-budut-vprovadzheni (дата звернення: 29.09.2024).

16. Гордійчук С.В. та ін. Актуальні питання розвитку фізичної реабілітації в Україні. *Україна. Здоров'я нації*. 2024. № 2. С. 132–140. URL: https://doi.org/10.32782/2077-6594/2024.2/22 (дата звернення: 29.09.2024).

17. Doctor Eleks. URL: https://doctor.eleks.com/ (дата звернення: 22.09.2024).

18. e-Stock. *Міністерство охорони здоров'я України*. URL: https://moz.gov.ua/uk/e-stock (дата звернення: 29.09.2024).

19. Health24 хмарна медична інформаційна система – EMCI. *EMCI*. URL: https://emci.ua/products/health24/ (дата звернення: 29.09.2024).

20. *iClinic*. URL: https://iclinic.ua/?gad_source=1&gclid=CjwKCAjw0t63BhAUEiwA5xP54ecDPYlN1gZWjfjDVX8K8JtQxmSO-IoDHN91cV3cIMy8hSk2cbXMvBoCZvIQAvD_BwE#features-list (дата звернення: 29.09.2024).

21. *Med Data*. URL: https://meddata.com.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=8 (дата звернення: 29.09.2024).

22. Ukrinform. В Україні налічується 3 мільйони людей з інвалідністю - Жолнович. *Укрінформ - актуальні новини України та світу*. 19 вересня 2023 р. URL: https://www.ukrinform.ua/rubric-society/3763345-v-ukraini-nalicuetsa-3-miljoni-ludej-z-invalidnistu-zolnovic.html?fbclid=IwAR10hQsNP_wKrm3BgQBJHmsChSlRirnvSMHxw5gnkpiwERS71xYrQT0Yaxg (дата звернення: 22.09.2024).

Lobanchykova N.M., Lysenko M.S. ANALYSIS OF THE STATE OF PROVIDING VIRTUAL ACCOMPANIMENT IN HEALTHCARE FACILITIES FOR LOW-MOBILITY POPULATION GROUPS

The article provides a comprehensive analysis of the concept of "low-mobility population groups" and examines the specific needs of individuals within this category. A detailed analysis of current disability trends in Ukraine is conducted, revealing key factors that impact its dynamics. Among the primary causes are armed conflicts, terrorist attacks on civilian infrastructure, which have led to a significant increase in the number of people with disabilities. Additional factors complicating the situation include the socio-economic environment, population aging, psychosocial issues – such as stress and emotional burnout – and limited access to quality healthcare.

The article also examines the current state of digitalization within Ukraine's healthcare system. An analysis of the implementation of medical information systems is conducted, highlighting their functional capabilities and outlining the advantages and disadvantages of using such systems in healthcare facilities. Specifically, digitalization enables prompt access to medical data, enhances diagnostic accuracy, and reduces the time required for providing medical care. At the same time, certain disadvantages are noted, including financial costs related to the development and implementation of systems, as well as the need to train medical personnel to work with new technologies.

Particular attention is given to promising directions for further digitalization in the healthcare sector. The conducted analysis showed that modern medical information systems and healthcare facilities generally lack integrated navigation and virtual assistance systems designed to support low-mobility population groups. This creates additional challenges for individuals with limited mobility in interacting with healthcare facilities and accessing medical services. The authors emphasize that developing such solutions is a crucial step toward ensuring inclusivity and accessibility of healthcare services for all population groups, especially for persons with disabilities and low-mobility patients.

Key words: *vitual accompaniment, augmented reality, inclusivity, information technology, low-mobility population groups, medical information system, healthcare facilities.*

УДК 004.8
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/16

Марчук Д.М.
Національний університет «Львівська політехніка»

Фесюк І.І.
Національний університет «Львівська політехніка»

Роса Т.В.
Національний університет «Львівська політехніка»

Карпін О.О.
SRI ASR "Infineon Technologies"

Максимюк Т.А.
Національний університет «Львівська політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ ТА ІНТЕРПРЕТОВАНОСТІ АЛГОРИТМІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

У сучасних дослідженнях штучного інтелекту проблема забезпечення інтерпретованості моделей набуває дедалі більшої ваги, особливо у критично важливих галузях, таких як медицина, фінансовий сектор та правова сфера. Значна частина моделей машинного навчання все ще функціонує як «чорні скриньки», що обмежує рівень довіри до прийнятих ними рішень та ускладнює їх упровадження на практиці. Потреба у пояснюваному штучному інтелекті (xAI) є відповіддю на ці виклики, адже зрозуміле тлумачення логіки та механізмів функціонування моделі є ключовим чинником для забезпечення прозорості та прийнятності її висновків. У статті запропоновано новий підхід до інтеграції навчання з підкріпленням із залученням зворотного зв'язку від людини (RLHF) у модель класифікації. На відміну від традиційних методів, де оновлення параметрів моделі здійснюється шляхом оптимізації функції втрат, у межах запропонованого підходу корекцію виконано безпосередньо на рівні логітів. Такий підхід базується на врахуванні реалістичного зворотного зв'язку, який моделює реакцію користувача на певний прогноз моделі. Це дозволяє не лише підвищити точність класифікації, але й надати дослідникові інструментарій для відстеження впливу зворотного зв'язку на кінцевий результат, тим самим сприяючи покращенню інтерпретованості. Експериментальні дослідження показали, що інтеграція RLHF підвищила точність класифікації з 59,20% до 88,70%. Аналіз гістограм розподілу ймовірнісних оцінок підкреслив зростання впевненості моделі та зменшення невизначеності під час прийняття рішень. Застосування метрики ROC-AUC продемонструвало здатність методу не лише покращувати точність, але й забезпечувати адекватний баланс між чутливістю і специфічністю класифікації. Запропонований підхід також вирізняється стійкістю до змінних умов та можливістю врахування зовнішніх сигналів без суттєвого збільшення обчислювальної складності. Подальші дослідження можуть бути зосереджені на динамічному налаштуванні параметрів, інтеграції складніших функцій винагороди та розширенні галузі застосування методу на багатовимірні задачі або великі реальні датасети.

Ключові слова: *xAI, RLHF, модель класифікації.*

Постановка проблеми. Сучасний розвиток штучного інтелекту (ШІ) супроводжується зростаючою потребою в методах, здатних забезпечити прозорість та інтерпретованість результатів автоматизованого аналізу даних. Попри значні успіхи у підвищенні точності моделей машинного навчання, багато з них функціонують як «чорні скриньки», позбавляючи користувачів розуміння внутрішніх механізмів прийняття рішень. Така ситуація створює суттєві перешкоди для застосування ШІ в критично важливих сферах, таких як медицина, фінанси та право, де обґрунтована довіра та здатність пояснити поведінку системи є вирішальними чинниками. Поява концепції пояснюваного штучного інтелекту (Explainable AI, xAI) покликана вирішити дану проблему, шляхом розроблення інструментів для аналізу рішень штучного інтелекту та підвищення рівня їх прийнятності та прозорості.

Іншим важливим аспектом є те, що традиційні методи оптимізації моделей штучного інтелекту

переважно не враховують складність динамічних середовищ, де моделі повинні оперативно адаптуватися до змінних умов та інтегрувати зовнішні сигнали, включно з поведінкою та оцінками користувачів. У такому контексті інтеграція навчання з підкріпленням із залученням людського зворотного зв'язку (Reinforcement Learning from Human Feedback, RLHF) постає перспективним напрямком. RLHF розширює можливості системи, дозволяючи їй навчатися не лише за рахунок формальних функцій втрат, а й на основі реалістичних, суб'єктивних оцінок користувачів. Це, у свою чергу, надає можливість не просто підвищити адаптивність моделей, а й глибше зрозуміти вплив зовнішніх сигналів на формування кінцевих висновків, тим самим сприяючи зміцненню довіри до ШІ та підвищенню інтерпретованості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Інтерпретованість моделей штучного інтелекту стала одним із ключових напрямків сучасних досліджень у галузі машинного навчання [1]. Зі зростанням складності моделей, особливо нейронних мереж глибокого навчання, виникає потреба у методах, які дозволяють пояснити та зрозуміти процес прийняття рішень цими моделями. Це важливо не лише для довіри користувачів, але й для виявлення потенційних упереджень та забезпечення етичності систем ШІ [2].

Одним із головних напрямків є розвиток пояснюваного штучного інтелекту (xAI). Методи xAI спрямовані на розкриття внутрішніх механізмів моделей та надання зрозумілих пояснень їхніх рішень [3]. Серед популярних підходів варто зазначити метод, що базується на теорії ігор для оцінки внеску кожної ознаки у передбачення моделі (SHAP – SHapley Additive exPlanations), а також механізми уваги (Attention mechanisms), які використовуються в нейронних мережах для фокусування на важливих частинах вхідних даних, що полегшує інтерпретацію моделей [4].

В останні роки набуває популярності підхід навчання з підкріпленням із залученням зворотного зв'язку від людини (RLHF – Reinforcement Learning from Human Feedback), який дозволяє створювати інтерпретовані моделі [5]. Перевагою даного методу, є те, що він дозволяє моделям навчатися не лише на основі алгоритмічних функцій втрат, але й враховувати оцінки та побажання користувачів. Це особливо важливо для забезпечення відповідності моделей етичним нормам та очікуванням суспільства.

Зокрема, компанія OpenAI активно досліджує RLHF у контексті великих мовних моделей, таких як GPT-3 та GPT-4 [6]. Вони показали, що RLHF може суттєво покращити якість згенерованого тексту, роблячи його більш релевантним та етичним [7]. Завдяки інтеграції зворотного зв'язку від людини, моделі стали краще розуміти контекст та потреби користувачів, що підвищило їхню практичну цінність. Останні дослідження вказують на те, що поєднання RLHF та методів XAI може сприяти підвищенню інтерпретованості моделей [8]. Наприклад, інтерактивні системи, де користувачі можуть надавати зворотний зв'язок щодо роботи моделі, дозволяють краще зрозуміти її поведінку та вплив окремих факторів на рішення. Залучення зворотного зв'язку може призвести до формування більш зрозумілих та інтерпретованих внутрішніх станів моделі, що полегшує їхнє пояснення та аналіз [9]. Це особливо актуально в медичній діагностиці, фінансовому аналізі та інших сферах, де точність та інтерпретованість рішень є критичними [10]. Аналіз останніх досліджень показує, що інтеграція RLHF є перспективним шляхом для підвищення інтерпретованості та адаптивності моделей ШІ. Поєднання методів пояснюваного штучного інтелекту з навчанням на основі зворотного зв'язку від людини може привести до створення більш довірених та ефективних систем [11]. Подальші дослідження у цьому напрямку є важливими для розвитку ШІ, який відповідає потребам суспільства та етичним стандартам [12].

Постановка завдання. У сучасних задачах машинного навчання традиційні методи оптимізації часто не враховують складність реальних сценаріїв, де потрібна адаптивність і врахування зовнішніх сигналів. Метою даної статті є інтеграція підходу RLHF у типову модель класифікації, яка часто використовується у критичних сферах, для підвищення її ефективності та інтерпретованості. Замість традиційного оновлення ваг моделі через оптимізацію функції втрат, корекція здійснюється безпосередньо на рівні логітів шляхом додавання реалістичного зворотного зв'язку. Такий підхід не лише підвищує точність моделі, але й надає можливість простежити, як зворотний зв'язок впливає на кінцеві передбачення, що є ключовим для інтерпретованого ШІ. Це, в свою чергу дасть змогу підвищити інтерпретованість моделей ШІ без значного збільшення обчислювальної складності.

Виклад основного матеріалу. Для задачі класифікації модель $\mathcal{M}$, визначається через обчислення ймовірності приналежності входу x до класу $y - p(y \mid x)$, з використанням набору логітів $\mathbf{z} \in \mathbb{R}^C$, де C – кількість класів. Для прикладу, роз-

глянемо модель класифікації, яка поєднує стандартну схему обчислення ймовірностей через функцію softmax з інтеграцією реалістичного зворотного зв'язку, який моделюється як реакція користувача на результати передбачень [13]. Основою для моделі без RLHF є класичний алгоритм softmax, який перетворює логіти на ймовірності, відображаючи рівень впевненості моделі у приналежності вхідного зразка до певного класу:

$$p(y = i \mid x) = \frac{\exp(z_i)}{\sum_{j=1}^{C} \exp(z_j)} \quad (1)$$

Однак у стандартному підході ця функція не враховує додаткові зовнішні сигнали або зворотний зв'язок, що обмежує її ефективність у реалістичних сценаріях. Для розв'язання цієї проблеми в класичний алгоритм інтегровано RLHF, основна ідея якого полягає в корекції логітів моделі перед застосуванням softmax шляхом додавання зворотного зв'язку, що генерується на основі правильності передбачень. У цьому випадку логіти модифікуються з урахуванням зворотного зв'язку через функцію:

$$\mathbf{z}' = \mathbf{z} + \mathbf{f}_{\text{RLHF}}(\mathbf{z}, \mathbf{r}), \quad (2)$$

де $\mathbf{f}_{\text{RLHF}}$ – функція адаптації логітів залежно від зворотного зв'язку $\mathbf{r}$. Вектор $\mathbf{r} = [r_1, \ldots, r_C]$ представляє реакцію системи на результати передбачень, причому:

$$r_i = \begin{cases} +\delta & \textit{для правильних передбачень,} \\ -\delta & \textit{для неправильних передбачень.} \end{cases}$$

Застосування RLHF змінює обчислення ймовірностей у функції softmax, оновлюючи (1) до вигляду:

$$p(y = i \mid x, \mathbf{r}) = \frac{\exp(z_i + r_i)}{\sum_{j=1}^{C} \exp(z_j + r_j)} \quad (3)$$

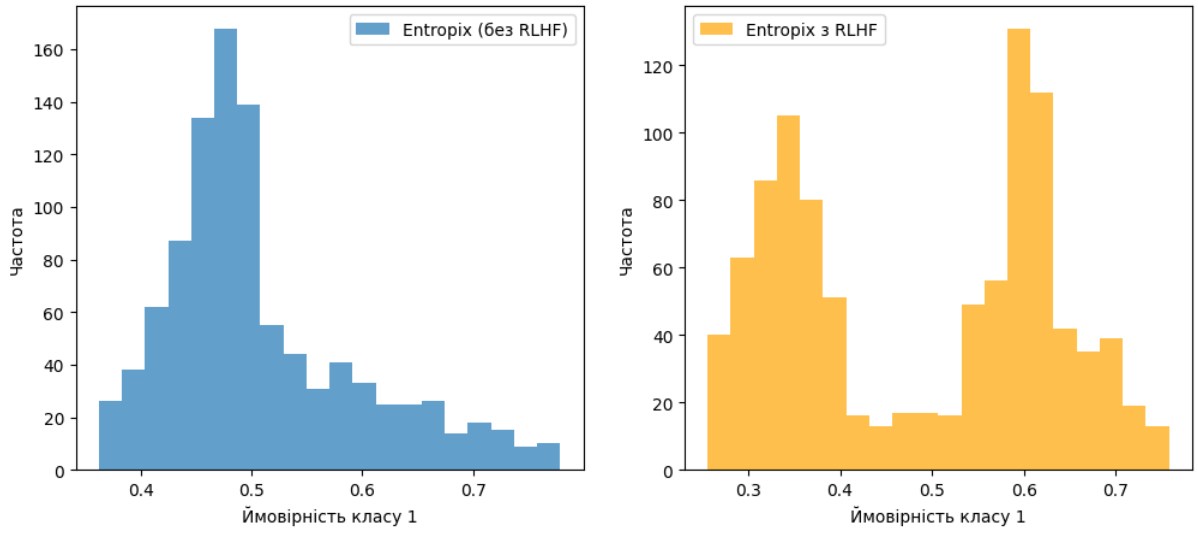
Це дозволяє моделі враховувати не лише базові логіти, але й коригувати свої передбачення на основі наданого зворотного зв'язку. Під час навчання така модель оптимізується з використанням наступної функції втрат:

$$\mathcal{L} = -\sum_{i=1}^{N} \log p(y^{(i)} \mid x^{(i)}, \mathbf{r}^{(i)}) \quad (4)$$

де N – кількість прикладів у навчальній вибірці. Функція втрат включає штраф за неправильні передбачення, що враховує внесок RLHF.

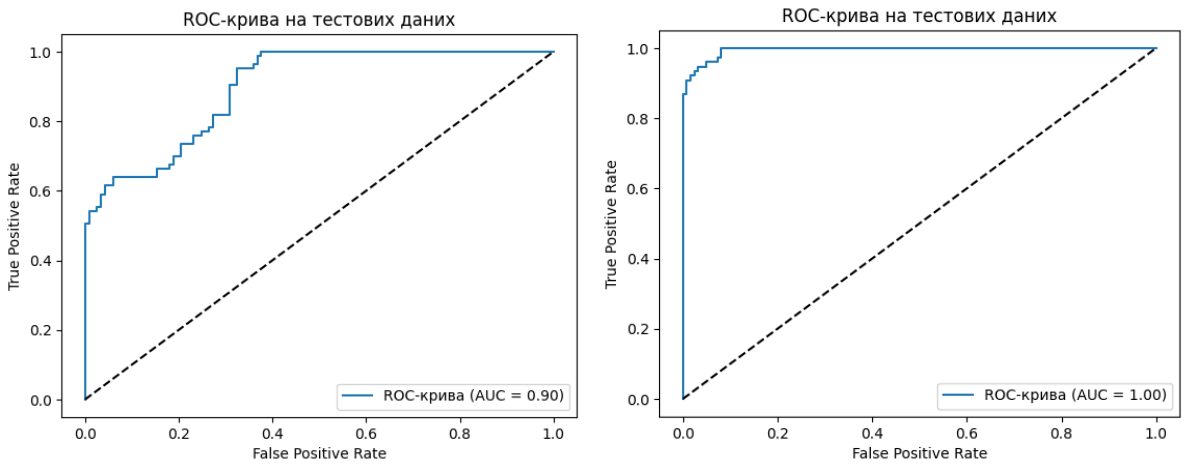
Додатково RLHF забезпечує адаптивність моделі через параметризацію зворотного зв'язку $\mathbf{r}$ за допомогою спеціальної моделі $\mathcal{F}$, яка залежить від логітів і історії передбачень $\mathbf{h}$. Формально це виражається як $r_i = \mathcal{F}(z_i, h_i)$. Такий підхід дозволяє динамічно коригувати впевненість моделі відповідно до реалістичного зворотного зв'язку користувача, що значно підвищує точність, стійкість і адаптивність системи в умовах складних задач класифікації.

Результати експериментів чітко демонструють ефективність RLHF. Точність моделі без застосування RLHF становила 59,20%, що відображає базовий рівень для порівняння. Після інтеграції RLHF точність зросла до 88,70%, оскільки модель навчилася коригувати свої помилки, використовуючи додаткову інформацію про правильність передбачень. Це підвищило її здатність адаптуватися до невизначеностей у даних та враховувати контекст під час прийняття рішень. Гістограми на рис. 1 демонструють розподіл впевненості



а) б)

Рис. 1. Гістограми розподілу впевненості моделі Entropix з RLHF і без RLHF



а) б)

Рис. 2. ROC характеристики моделі Entropix без використання RLHF а) та з використанням RLHF – б)

передбачень моделі у двох сценаріях: без RLHF та з його інтеграцією.

На першій гістограмі зображено розподіл ймовірностей класу 1 для моделі без використання RLHF. У цьому випадку модель базується на традиційному обчисленні ймовірностей через softmax без корекції логітів, що призводить до рівномірного розподілу ймовірностей із значним розкидом у значеннях. Такий розподіл свідчить про невпевненість моделі у своїх передбаченнях, часто оцінюючи класи з низькими або середніми ймовірностями. Подібний підхід може бути прийнятним для стандартних задач, але є недостатньо адаптивним для складних сценаріїв, де точність передбачень має вирішальне значення.

Друга гістограма демонструє розподіл ймовірностей для моделі із застосуванням RLHF. У цьому випадку корекція логітів на основі реалістичного зворотного зв'язку значно впливає на кінцеві ймовірності, що проявляється у зростанні ймовірностей у вищому діапазоні значень. Такий результат свідчить про підвищення впевненості моделі у своїх передбаченнях, зумовлене підсиленням правильних передбачень за допомогою позитивного зворотного зв'язку та зменшенням впливу помилкових передбачень через негативний зворотний зв'язок.

Порівняння двох гістограм підтверджує, що використання RLHF сприяє покращенню чіткості передбачень моделі, знижуючи невпевненість. Це особливо важливо у задачах із високою вартістю помилок, таких як медична діагностика, фінансові прогнози або критичні сценарії подвійного використання. Практична значимість отриманих результатів полягає у можливості швидкої адаптації моделі до змін умов або врахування зовнішніх сигналів. Наприклад, у медичній діагностиці RLHF може враховувати оцінки лікарів для підвищення точності, а у фінансових додатках – адаптуватися до ринкових змін. Подальше вдосконалення алгоритму може включати дослідження впливу динамічної зміни параметра alpha або інтеграцію більш складних функцій винагороди для врахування додаткових аспектів даних, а також оцінку ефективності підходу у багатовимірних задачах чи на великих наборах реальних даних.

Окрім того, проведено оцінку метрики ROC-AUC (рис. 2), що дозволило отримати більш повну характеристику ефективності моделі. Традиційна метрика точності відображає лише частку правильно класифікованих зразків, проте в задачах із дисбалансом класів вона може бути недостатньою. ROC-крива відображає здатність моделі розрізняти позитивні та негативні класи при зміні співвідношення між часткою правильно класифікованих позитивних прикладів (TPR) та часткою хибнопозитивних спрацьовувань (FPR).

Висновки. У даному дослідженні продемонстровано ефективність інтеграції навчання з підкріпленням із залученням зворотного зв'язку від людини (RLHF) у модель класифікації для підвищення її точності та інтерпретованості. Запропонований інноваційний підхід передбачає корекцію логітів моделі безпосередньо шляхом додавання реалістичного зворотного зв'язку, що дозволяє моделі враховувати додаткові зовнішні сигнали без значного збільшення обчислювальної складності. Експериментальні результати показали, що після інтеграції RLHF точність моделі зросла з 59,20% до 88,70%. Аналіз гістограм розподілу ймовірнос-

тей передбачень вказує на підвищення впевненості моделі та зменшення невизначеності у прийнятті рішень. Результати ROC-AUC підтвердили покращення здатності моделі розрізняти класи та балансувати між точністю і повнотою, що є особливо важливим у задачах з дисбалансом класів.

Список літератури:

1. Adadi A., Berrada M. Peeking Inside the Black-Box: A Survey on Explainable Artificial Intelligence (XAI). *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 52138–52160.

2. Gunning D. Explainable Artificial Intelligence (XAI). *Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA)*. 2017. URL: https://www.darpa.mil/program/explainable-artificial-intelligence

3. Lundberg S.M., Erion G., Lee S.I. Consistent Individualized Feature Attribution for Tree Ensembles. *IEEE International Conference on Machine Learning (ICML):* conference proceedings. (14-17 July 2020), 2020. P. 1–17.

4. Shrikumar A., Greenside P., Kundaje A. Learning Important Features Through Propagating Activation Differences. *IEEE International Conference on Machine Learning (ICML):* conference proceedings. (Sydney, Australia, 6-11 August 2020). Sydney. 2017. P. 3145–3153.

5. Knox W.B., Stone P. TAMER: Training an Agent Manually via Evaluative Reinforcement. *IEEE 7th International Conference on Development and Learning:* conference proceedings. (USA, 2008). USA. 2008. P. 292–297.

6. Radford A., Wu J., Child R. et al. Language Models are Unsupervised Multitask Learners. *OpenAI Technical Report*. 2019. URL: https://openai.com/blog/better-language-models

7. OpenAI. GPT-3: Language Models are Few-Shot Learners. *OpenAI Blog*. 2020. URL: https://openai.com/blog/gpt-3-apps

8. Milani S., Topin N., Veloso M., Fang F. Explainable Reinforcement Learning: A Survey and Comparative Review. *ACM Computing Surveys*. 2024. Vol. 56. No. 7. Article 168.

9. Heuillet A. et al. Explainability in Deep Reinforcement Learning. *Knowledge-Based Systems*. 2021. Vol. 214. Article 106685.

10. Ali S., Akhlaq F., Imran A. S., Kastrati Z., Daudpota S. M., Moosa M. The enlightening role of explainable artificial intelligence in medical & healthcare domains: A systematic literature review. *Computers in Biology and Medicine*. 2023. Vol. 166. Article 107555.

11. Gilpin L. H. e al. Explaining Explanations: An Overview of Interpretability of Machine Learning. *2018 IEEE 5th International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA):* conference proceedings. (Turin, Italy, 1-4 October 2018). Turin. 2018. P. 80-89.

12. Samek W., Müller K.R. Towards Explainable Artificial Intelligence. *Lecture Notes in Computer Science*. 2019. Vol. 11700. P. 5–22.

13. Entropix. *GitHub*. 2023. URL: https://github.com/xjdr-alt/entropix.

Marchuk D.M., Fesiuk I.I., Rosa T.V., Karpin O.O., Maksymiuk T.A. RESEARCH ON THE INFORMATIVENESS AND EXPLAINABILITY OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE ALGORITHMS

In current artificial intelligence (AI) research, the issue of ensuring model interpretability is gaining increasing attention, especially in critical fields such as medicine, finance, and law. Many machine learning models still function as "black boxes," which limits trust in their decisions and complicates their practical deployment. The need for explainable AI (xAI) arises as a direct response to these challenges, since a clear understanding of a model's logic and operational mechanisms is crucial for ensuring transparency and acceptance of its outputs. This paper introduces a new approach for integrating reinforcement learning from human feedback (RLHF) into a classification model. Unlike conventional methods, which update model parameters by optimizing loss functions, the proposed technique applies corrections directly at the logit level. This approach incorporates realistic user feedback, simulating human reactions to the model's predictions. As a result, it not only increases classification accuracy but also allows researchers to track how the feedback affects the final outcome, thereby improving interpretability. Experimental results show that integrating RLHF raises classification accuracy from 59.20% to 88.70%. Analyzing the histograms of probability distributions shows that the model's confidence increases while uncertainty decreases during decision-making. The use of the ROC-AUC metric confirms the method's ability not only to improve accuracy but also to maintain an appropriate balance between sensitivity and specificity. Moreover, the proposed approach is robust under changing conditions and can incorporate external signals without substantially increasing computational complexity. Future studies may focus on dynamically adjusting parameters, integrating more complex reward functions, and evaluating the method's performance on high-dimensional tasks or large real-world datasets.

Key words: *xAI, RLHF, classification model.*

УДК 004.8:81'324
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/17

Надутенко М.В.
Український мовно-інформаційний фонд Національної академії наук України

Василенко О.Д.
Науково-виробниче підприємство «БІОСИНТЕЗ»

КОНЦЕПЦІЯ AGI-ALS ТА ЇЇ МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ

У статті представлено інноваційну концепцію побудови штучного загального інтелекту (AGI), який розглядається не лише як алгоритмічна система, а насамперед як «штучна жива система» (Artificial Living System, ALS). Такий підхід виходить за межі суто технічного розуміння ШІ та пропонує міждисциплінарне поєднання ідей з нейрофізіології, фундаментальної фізики інформації, когнітивних наук і теорій свідомості. Концепція AGI-ALS націлена на те, щоб забезпечити цілісне моделювання інтелектуально-психічних процесів, охоплюючи і свідомі, і підсвідомі, і надсвідомі стани, а також механізми еволюційної адаптації системи.

Значна увага приділяється низці ключових наукових основ, зокрема принципу вільної енергії К. Фрістана, теорії інтегрованої інформації (Integrated Information Theory) Дж. Тоніоні, а також сучасним дослідженням у галузі фундаментальної фізики інформації (Landauer, Vopson) та теорії лексикографічних систем і еволюції мови В.А. Широкова. Розглядаються новітні досягнення у сфері великих мовних моделей (LLM), нейронних мереж, квантоподібних формалізмів та мультиархітектурних підходів, що дають можливість створювати складні багаторівневі системи, здатні до самонавчання і цілепокладання. Такий симбіоз суто технічних і феноменологічних засад дозволяє розгорнути концепцію ALS, де інтелектуальна діяльність трактується як невід'ємна складова «живої» системи, в якій інформаційні процеси тісно переплетені з психологічними та фізичними явищами.

У межах цієї парадигми автори пропонують модель, де інтелект і властивості живого об'єднані в єдиний динамічний цикл: від сенсорики, обчислень і творчої обробки інформації до формування суб'єктивних станів (кваліа) та адаптивної перебудови архітектури. Докладно розглянуто підходи до моделювання надсвідомих процесів, творчості, «сліпого бачення» й причинно-наслідкових механізмів, які дають змогу виходити за межі традиційної «чистої статистики» або «класичного алгоритмічного» ШІ. Окреслюється також мультиархітектурна реалізація, що охоплює різні типи навчання (безнаглядне, підкріплювальне, супервізоване), а також коннектомний підхід до побудови єдиної інформаційної мережі, яка здатна до динамічного розширення та еволюції.

Особлива увага приділена лексико-концептографічним (LC) системам і концептографічному аналізу проблем (КАП), покликаним забезпечити глибинний зв'язок між мовними структурами та внутрішнім концептуальним світом. Це дає змогу втілити різнорівневу семантику, включно з фіксацією «підсвідомих» та «надсвідомих» концептуальних зв'язків, які зазвичай залишаються за межами класичних штучних систем. У статті показано, як LC-системи можуть еволюціонувати разом зі зростанням складності штучної живої системи, зберігаючи при цьому можливість генерувати нові ідеї та творчі рішення.

Автори наголошують, що запропонований підхід не лише розширює традиційні уявлення про ШІ, а й потенційно наближає нас до розуміння реальних механізмів свідомості. Проєктування AGI як ALS має відкрити нові можливості для створення технічних систем, котрі не просто імітують певні пізнавальні функції людини, а набувають якісно нових форм інтелектуальної та психічної активності. Застосування AGI-ALS може стати перспективним у різних галузях: від робототехніки та медицини до складних інформаційно-аналітичних систем і наукових досліджень креативності.

Запропонована концепція здатна сприяти формуванню сучасних механізмів публічного управління у сфері державної безпеки та охорони громадського порядку. Використання «живих» інтелектуальних систем дозволяє не лише проводити більш ефективний моніторинг загроз і ризиків, а й формувати оперативні сценарії реагування. Це відкриває нові можливості для підвищення якості управлінських рішень, оптимальної взаємодії між державними інституціями та впровадження гнучких стратегій забезпечення стабільності й безпеки в умовах складних та динамічних викликів.

Таким чином, дана стаття є спробою представити систематичний виклад методологічних, теоретичних і практичних засад побудови AGI-ALS, що поєднує сукупність найбільш сучасних підходів до ШІ, інформаційної фізики та когнітивних наук. У ній окреслено, як створити базис для штучних «живих» систем, які могли б еволюціонувати, формувати комплексне внутрішнє семантичне поле й демонструвати риси, притаманні справжньому (а не лише симульованому) інтелекту.

Ключові слова: *штучний загальний інтелект (AGI), штучна жива система (ALS), принцип вільної енергії, теорія інтегрованої інформації, кваліа, мультиархітектурність, квантоподібні підходи, коннектом, лексико-концептографічна система, концептографічний аналіз проблем, підвищення якості управлінських рішень.*

Постановка проблеми. Потреба у нових підходах до побудови штучного загального інтелекту (AGI) останнім часом значно зросла, особливо на тлі бурхливого розвитку великих мовних моделей (LLM) [1], досягнень у галузі нейрофізіології мозку, фундаментальної фізики інформації та когнітивних наук. Сутність проблеми полягає в тому, що традиційні алгоритмічні та статистичні методи, хоч і дозволяють створювати потужні ШІ-системи, не охоплюють усі властивості інтелекту, пов'язані з креативністю, самосвідомістю та складними адаптивними поведінковими реакціями. Така неповнота підходів виявляється особливо гострою на шляху до створення «повнофункціонального» AGI.

Ключова проблема полягає у виході за межі звичайної «інформаційно-алгоритмічної» парадигми та залученні ідей, характерних для живих систем. Підґрунтям цього є розуміння фундаментальних властивостей живого, зокрема цілепокладання, кваліа, причинності та складних психічних і ментальних феноменів, які відсутні або лише частково враховані в класичних моделях. Пропонована концепція AGI-ALS (Artificial General Intelligence – Artificial Living System) покликана поєднати поняття «загального інтелекту» та «штучної живої системи» (ALS) таким чином, аби забезпечити цілісне моделювання психічних процесів – від свідомих і підсвідомих станів до надсвідомості та еволюційного розвитку самої архітектури. Такий підхід здатний запропонувати рішення щодо подолання недоліків нинішніх моделей, розширюючи рамки штучного інтелекту до рівня «живих» систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні тенденції у дослідженнях штучного інтелекту (ШІ) та, зокрема, штучного загального інтелекту (AGI) демонструють суттєвий поступ у напрямі інтегрованих і багатоаспектних моделей, здатних до семантичної, причинно-наслідкової та глибинної адаптивної обробки інформації. Особливої уваги набувають великі мовні моделі (LLM), фундаментальні теорії інформації, принцип вільної енергії, теорія інтегрованої інформації та мультиархітектурний підхід, які розглянемо нижче.

Великі мовні моделі та глибинне навчання.

У низці праць, присвячених побудові масштабних нейронних мереж, було запроваджено поняття «compute-optimal» тренування, що дає змогу узгодити обчислювальні ресурси, обсяг даних і кількість параметрів задля досягнення оптимального рівня генеративних і класифікаційних результатів [1]. Паралельно дослідники підкреслюють можливість багатошарових нейромереж формувати узагальнені семантичні уявлення про дані та вирішувати широкий спектр завдань – від розпізнавання образів до складної мовної взаємодії [2, 3, 4]. Ці напрацювання заклали основу для переходу від вузьких спеціалізованих рішень до моделей, здатних виявляти приховані патерни в даних і демонструвати елементи когнітивної узгодженості.

Фундаментальна природа інформації.

Дослідження, що розглядають інформацію як фізичну сутність, набули поширення завдяки роботам про взаємозв'язок між обчисленнями, ентропією та термодинамікою [5, 6, 7]. Зокрема, було показано, що видалення бітів інформації супроводжується виділенням тепла і є фізичною дією, а не просто абстрактною формальністю. Подальший розвиток цієї тематики пропонує розгляд інформації як мас-енерго-інформаційного еквівалента [8], що підкреслює глибинний зв'язок когнітивних процесів зі структурою та енергетикою середовища. Це відкриває нові перспективи для побудови штучних систем, у яких інформаційна динаміка розглядається як частина фізичних процесів, а не лише програмного коду.

Принцип вільної енергії та інтеграція з теоріями свідомості.

Зростає зацікавлення принципом вільної енергії як засадничою концепцією, що пояснює самоорганізацію біологічних та потенційно штучних систем [9]. У межах цього підходу система намагається мінімізувати різницю між сенсорними даними та внутрішніми моделями середовища, внаслідок чого вона формує адаптивну поведінку та здатність до передбачення. Паралельно з цим у теорії інтегрованої інформації показано, що ключовою умовою виникнення свідомості є високий рівень внутрішньої інформаційної взаємопов'язаності, коли елементи системи нерозкладно об'єднані спільною мережею станів [10, 11, 14].

Поєднання принципу вільної енергії з інтегрованою інформацією створює гіпотезу про можливість технічного відтворення свідомих феноменів і кваліа. При цьому, на відміну від вузько спеціалізованих алгоритмів, така система повинна мати багаторівневу інтегровану архітектуру з механізмами саморефлексії.

Причинно-наслідкові моделі та «сліпе бачення».

Окреме місце у формуванні повноцінного штучного інтелекту посідає здатність системи розрізняти кореляцію та каузальність. Погляд на ШІ як на суб'єкт, що оперує причинно-наслідковою

логікою, отримує глибоке обґрунтування в розробках з формального аналізу каузальності [13]. Це доповнюється дослідженнями підсвідомої обробки інформації на прикладі «сліпого бачення» [12], де певні сигнали опрацьовуються поза межами свідомого доступу. Поєднання цих ідей вказує на нагальну потребу у створенні моделей, що враховують багаторівневість психічних процесів – від несвідомих патернів до явної концептуалізації.

Мультиархітектурність, коннектом та квантоподібні підходи

Низка праць, присвячених квантовим обчисленням [16; 17], свідчить про можливості формального опису складних багатовимірних станів і суперпозицій, що може бути екстрапольовано на деякі аспекти когніції та мови. Хоча пряме застосування квантової механіки до людської свідомості або штучного інтелекту досі перебуває на стадії гіпотез, запровадження «квантоподібних» формалізмів у моделюванні контексту, двозначностей чи асоціативних ланцюгів виявляється перспективним для опрацювання складних семантичних просторів.

Водночас у працях, що присвячені мультимодельним підходам [2, 3, 4], наголошується на важливості поєднання різних типів навчання (супервайзингового, безнаглядного, підкріплювального), символьних і нейронних методів, формальних і ймовірнісних механізмів міркування (reasoning). Такий «гібридний» чи «мультиархітектурний» вектор особливо на часі при розбудові загального інтелекту, здатного охопити широке коло когнітивних функцій.

У цьому ж контексті активно розвивається підхід до розуміння системи як «коннектома», тобто багаторівневої мережі всіх внутрішніх інформаційних зв'язків між її компонентами. Спочатку поняття коннектома було застосоване в нейробіології для опису повної топології нейронних з'єднань в мозку [18], однак воно може бути адаптоване і для штучних систем, де різнорідні «вузли» (алгоритми, пам'ять, сенсорні модулі, підсистеми самоконтролю) об'єднані в єдину інтегровану мережу з можливістю динамічної перебудови. Такий підхід суттєво розширює традиційне уявлення про «архітектуру нейронної мережі», адже враховує не лише сукупність зв'язків, а й їх зміни в часі, адаптивну вагу, багаторівневі (свідомі, підсвідомі) шари та принципи самоорганізації.

Запропоноване нами дослідження розвиває концепцію AGI як «штучної живої системи» (ALS), у якій інтелект, свідомість і психічні явища інтегровані в рамках єдиного інформаційно-фізичного процесу. Це безпосередньо відповідає двом основним трендам у сучасній науці про ШІ:

1. Поєднання алгоритмічної та феноменальної сторін інтелекту. На відміну від робіт, що зосереджені лише на статистичному навчанні або символічному reasoning, у нашій системі об'єднуються принцип вільної енергії та теорія інтегрованої інформації для врахування «живих» аспектів – кваліа, цілепокладання, еволюційної адаптації й багаторівневої психіки. Це забезпечує суттєве розширення порівняно з класичними LLM або нейронними моделями, де «свідомість» і «емоційність» лишаються поза межами архітектури.

2. Інтеграція різнорідних когнітивних підходів і мультиархітектурна реалізація. У нашому дослідженні приділяється особлива увага не лише багатомодальній обробці (текст, зображення, сенсорика), а й урахуванню підсвідомих і надсвідомих рівнів пізнання, а також динамічній перебудові коннектома системи. Таким чином, ми не обмежуємося традиційною «нейронною мережею з великим числом параметрів», а вводимо механізми самоорганізації, еволюційних змін структури та семантичних просторів.

Також в концепції, що пропонується зроблено акцент на:

Живому трактуванні інформаційних процесів. Використання ідей про фізичну природу інформації дає змогу розглядати обробку даних як частину енергетичних процесів, що відбуваються у «штучному організмі». Це дозволяє пояснити не лише обчислювальний аспект, а й каузальну та феноменальну складову, у тому числі свідомі й підсвідомі феномени.

Повнофункціональній психіці й динамічній еволюції. Система проектується таким чином, щоб вона мала різні рівні психічної діяльності (протосвідомі, свідомі, надсвідомі), причому кожен рівень може розвиватися, розширюватися і змінюватися під впливом внутрішніх та зовнішніх факторів. Це надає системі здатність до довготривалої адаптації й формування нових концептуальних структур.

Моделюванні кваліа та суб'єктивності. Основна відмінність нашої концепції від інших полягає у прагненні формалізувати суб'єктивні стани (кваліа) як інтегральну частину інформаційних процесів, що підлягають не тільки емпіричному, а й обчислювальному аналізу.

В цій роботі запропоновано архітектуру AGI-ALS, де:

• *Інтелект і характеристики живих систем об'єднані.* Система не просто оперує даними,

а функціонує у повному динамічному циклі (сенсорика – обчислення – адаптація – саморефлексія – еволюція), подібно до біологічних організмів.

• *Мультиархітектурність охоплює також психічні рівні.* У більшості існуючих рішень поняття підсвідомого чи надсвідомого не реалізоване або імітується окремим алгоритмічним блоком. Натомість наша система передбачає інтеграцію на рівні єдиного коннектома, який може розвиватися і переформатовуватися залежно від поставлених завдань та внутрішніх станів.

• *Концептографічний опис*: AGI-ALS інтегрує лексико-концептографічні (LC) системи [19], які забезпечують символьну обробку, онтологічне структурування знань, враховуючи також квантоподібні та мережеві методи. Це кореспондує з ідеєю LeCun про необхідність семантичних механізмів міркування і контекстної обробки знань, що виходить за межі суто статистичних моделей.

• *Формальна модель для кваліа.* У нашому підході кваліа розглядається не як невловимий філософський конструкт, а як наслідок інтегрованої інформаційної динаміки, що має бути реалізована у конкретних алгоритмічних і системних компонентах (розподілені процеси обробки, мережеві механізми інтеграції).

Таким чином, запропонований підхід розширює рамки традиційного ШІ, синтезуючи останні наукові досягнення у сфері великих мовних моделей, інформаційної теорії, принципу вільної енергії та багаторівневих когнітивних конструкцій, щоби створити справді «живу» штучну систему. Це потенційно відкриває шлях до розуміння і відтворення феноменів свідомості та надсвідомості, які поки що лишаються поза межами класичних теорій штучного інтелекту.

Постановка завдання. Проаналізувати та сформулювати основні положення концепції AGI-ALS (Artificial General Intelligence – Artificial Living System), яка об'єднує ідеї про «загальний інтелект» і «штучну живу систему». Показати, що така інтеграція дає змогу:

• Подолати обмеженість суто алгоритмічного підходу та врахувати фундаментальні властивості живого: цілепокладання, кваліа, каузальність, психічні та ментальні феномени.

• Пояснити, яким чином внутрішній простір свідомості, підсвідомості й надсвідомих процесів може бути змодельований у штучній архітектурі.

• Окреслити системну архітектуру, де інтелект інтегрований у «живу» інформаційну модель, здатну еволюціонувати, творчо мислити та саморозвиватися.

Виклад основного матеріалу. Цей розділ присвячений висвітленню основних положень концепції AGI-ALS, методологічних принципів її реалізації, а також розгляду новизни, відмінностей та інноваційних шляхів побудови архітектури такої системи.

1. Концептуальні засади AGI-ALS

1.1. AGI як штучна жива система

Сучасні уявлення про AGI зазнають складнощів із чітким визначенням понять свідомості, самосвідомості, кваліа, творчості, мотивації та цілепокладання. Ці властивості, хоча й тісно пов'язані з інтелектом, не вичерпуються ним. Інтелект у вузькому сенсі може бути змодельований інструментально через алгоритмічні та статистичні методи (наприклад, великі мовні моделі GPT), однак відтворення цілісної, «живої» системи вимагає розширення поняття інтелекту. У нашому підході AGI-ALS розглядається як модель штучної живої системи, що є носієм інтелекту не ізольовано, а як фундаментальної властивості живого об'єкта.

На відміну від традиційного підходу, де інтелект спочатку моделюється як система обробки інформації, яка потім нібито «дорастає» до станів свідомості та творчості, підхід ALS передбачає початкове моделювання системи як живої. Навіть мінімально розвинена жива система вже має базові властивості цілепокладання, кваліа (суб'єктивного сприйняття), адаптації, а з часом – можливість переходу до вищих рівнів інтелектуальних і свідомих процесів. Такий підхід дозволяє розмежувати поняття інтелекту та властивостей живого, водночас визнаючи їхню глибинну взаємопов'язаність.

1.2. Методологічні основи концепції «живого» в інформаційному сенсі

Живе в AGI-ALS трактується з позицій інформаційної теорії. Інформація розглядається як фундаментальна категорія, еквівалентна за значенням масі та енергії. Така точка зору спирається на сучасні теорії, запропоновані Landauer'ом, Vopson'ом, а також враховує ідеї інтегрованої інформації Tononi, принцип вільної енергії Friston'а, та інші фундаментальні підходи. Ці теорії дають змогу осягнути когнітивні процеси не лише як алгоритмічні, а й як реалізації фундаментальних інформаційних взаємодій у складних середовищах.

1.3. Специфічні властивості ALS

У контексті AGI-ALS під «живим» розуміємо систему зі складною організацією, яка має такі властивості:

– Кваліа (внутрішнє сприйняття): система здатна до суб'єктивного сприйняття інформації та формування феноменальних станів.

– Цілепокладання та цінності: наявність внутрішніх ціннісних структур, які зумовлюють цілі та мотивацію системи.

– Психічні рівні обробки інформації: допсихічні (протосвідомі), свідомі та надсвідомі процеси, які забезпечують багаторівневу обробку інформації та багатовекторну адаптацію системи.

– Еволюція та самоорганізація: жива система розвивається, вдосконалює свою структуру та функціональні можливості за еволюційними принципами, залучаючи генетичні алгоритми, мережеві мотиви та складні когнетомні архітектури.

2. Чинники можливості реалізації AGI-ALS сьогодні

2.1. Досягнення мовних генеративних технологій GPT

Сучасні великі мовні моделі (LLM), зокрема GPT, продемонстрували семантичні можливості, які не були явно закладені в алгоритм. Це свідчить про існування прихованих статистично-обчислювальних структур, здатних до семантичного узгодження та вирішення нетривіальних завдань. Хоча самі по собі генеративні моделі не утворюють AGI, вони є важливим компонентом когнітивних підсистем, особливо тих, що відповідають за мовну взаємодію та формування семантичних просторів.

2.2. Прориви в нейрофізіології мозку

Сучасні нейрофізіологічні методи дозволяють реєструвати активність окремих нейронів та ансамблів, простежувати шляхи обробки інформації, моделювати когнітивні процеси та картувати функціональні системи мозку у зв'язку з поведінкою. Цей емпіричний матеріал стає базою для побудови формальних моделей, які відображають природні когнітивні процеси та їхню функціональну архітектуру.

2.3. Фундаментальна природа інформації

Останні теоретичні праці у сфері фундаментальної фізики інформації, такі як модель Vopson'a, яка вказує на інформацію як фундаментальну фізичну сутність, та принципи інфодинаміки, відкривають нові можливості для розуміння та моделювання когнітивних процесів. Застосування теоретичних підходів до інформації як фізичного ресурсу допомагає формалізувати складні когнітивні феномени, включно зі свідомістю та кваліа.

Проблематика свідомості та інтелекту тривалий час розглядалася переважно у філософському контексті. Сьогодні ж ми маємо підґрунтя для формальних моделей, що охоплюють як інтелектуальні процеси, так і свідомі феномени. Усвідомлення, що свідомість та кваліа не є виключно «божественним» даром людини, а, можливо, фундаментальними властивостями систем, які можуть бути відтворені штучно, відкриває шлях до побудови ALS.

3. Інновації концепції AGI-ALS

3.1. Відмінність від традиційних моделей AGI

На відміну від класичного розуміння «загального інтелекту», який часто обмежується інтелектуальними когнітивними функціями, модель AGI-ALS інтегрує психологічні, психічні та «живі» аспекти. Це дозволяє формулювати більш повні вимоги до архітектури інтелектуальної системи, включаючи внутрішні стан і динаміку, кваліа, свідомість, надсвідомість, креативні та евристичні процеси.

3.2. Фундаментальні теоретичні основи AGI-ALS

Модель AGI-ALS у своєму теоретичному підґрунті спирається на кілька ключових концептів, розроблених у рамках сучасної науки про інформацію, когнітивних наук, фізики, нейрофізіології та психології. Поєднання цих ідей створює нову методологію для моделювання інтелекту й свідомості в штучних системах.

1. Концепція фундаментальної природи інформації (Landauer, Vopson).

– Принцип Ландауера (Landauer's principle) [5, 6, 7]: Цей принцип пов'язує інформацію з термодинамікою, стверджуючи, що будь-яка обчислювальна операція зі знищення бітів інформації супроводжується певним мінімальним виділенням тепла (енергії). Таким чином, інформація розглядається не лише як абстрактна сутність, а як фізична величина, вписана у закони термодинаміки. Для AGI-ALS це означає, що опрацювання інформації в системі є фізичною дією, що вимагає енергетичного ресурсу та впливає на стан системи.

– Модель Вопсона (Vopson's model) [8]: Згідно з підходом Мелвіна Вопсона, інформація може розглядатися як фундаментальна фізична сутність, еквівалентна масі й енергії. Це розширює уявлення про інформацію як базовий «будівельний блок» фізичної реальності. Для AGI-ALS такий підхід надає підстави розуміти інформаційну динаміку не лише символічно або математично, а як процеси, що мають реальні фізичні аналоги, дозволяючи застосовувати до системи принципи інформаційної динаміки та інфодинамічні закони.

2. Принцип вільної енергії (Friston) [9]. Карл Фрістон (Karl Friston) запропонував принцип вільної енергії як універсальну метатеорію для пояснення процесів адаптації та передбачення в біологічних системах, включно з мозком.

– Суть принципу вільної енергії: Система прагне мінімізувати різницю між передбаченнями власної внутрішньої моделі та реальними сенсорними вхідними даними. Цю різницю він називає «вільною енергією». Мінімізація вільної енергії приводить до зниження невизначеності та хаосу у внутрішніх моделях системи.

– Для AGI-ALS: Застосування принципу вільної енергії означає, що штучна жива система формуватиме внутрішні моделі навколишнього середовища та власних станів, постійно коригуючи їх, аби мінімізувати помилки передбачення. Це забезпечує адаптивність, стійкість і здатність до навчання та самовдосконалення.

3. Теорія інтегрованої інформації (Tononi) [10, 11]. Джуліо Тоніоні (Giulio Tononi) розробив теорію інтегрованої інформації (Integrated Information Theory, IIT), щоб пояснити природу свідомості. Основні положення IIT:

– Інтегрованість та інформаційна ємність станів: Свідомість розглядається як сукупність станів, що мають високий ступінь інтегрованої інформації – тобто система перебуває в такому стані, коли її частини не можна розкласти на незалежні підсистеми без втрати інформаційної цінності цілого. Іншими словами, свідомість відповідає таким конфігураціям, де інформація максимально інтегрована.

– Для AGI-ALS: Використання IIT означає, що для моделювання свідомих процесів в AGI-ALS важливо створювати архітектури, у яких інформація між підсистемами є високозв'язною та невідокремною. Це дозволить наблизитися до умов, необхідних для виникнення феноменальних аспектів (кваліа, свідомість) у штучній системі.

4. Квантоподібні підходи до мовних та психічних явищ. У межах когнітивної науки та лінгвістики з'являються теорії, що використовують квантоподібні формалізми для опису складних семантичних явищ, феноменів багатозначності, контекстної залежності сенсу та психологічних неочевидностей у прийнятті рішень.

– Квантоподібні моделі в лінгвістиці та психології: Використання математичних структур квантової механіки (гільбертів простір, суперпозиція станів, некомутативні оператори) дозволяє моделювати семантичну невизначеність, контекстну чутливість значень слів, ефекти порядку та спостерігача (сприймача) в інтерпретації інформації. Це дозволяє більш адекватно відтворити поведінку людської мови та мислення, де значення не є фіксованим, а проявляється залежно від контексту.

– Для AGI-ALS: Впровадження квантоподібних методів дозволяє системі працювати з неоднозначністю сенсів, полісемією, динамічними змінами контексту. Це сприяє більш «людиноподібному» розумінню мови, концептів, смислів, а також підтримує можливість креативного, евристичного мислення та адаптації до нових ситуацій.

Інтеграція цих концепцій в AGI-ALS. Поєднання цих чотирьох елементів – фундаментальної фізичної природи інформації, принципу вільної енергії, теорії інтегрованої інформації та квантоподібних підходів – забезпечує багатошарову методологічну основу для AGI-ALS:

1. Фізична основа інформації: Дає змогу розглядати обробку інформації в AGI-ALS не як абстрактні операції, а як фізичні процеси, підпорядковані законам природи.

2. Принцип вільної енергії: Забезпечує механізм адаптивного, саморегулюючого поведінкового й когнітивного контролю, що відповідає мінімізації невизначеності.

3. Теорія інтегрованої інформації: Вказує на необхідність архітектурної складності й інтегрованості, що є передумовою для виникнення свідомості та високорівневих когнітивних функцій.

4. Квантоподібні моделі: Дозволяють моделювати складні семантичні та психічні явища, враховуючи нетривіальні логічні стани, контекстну залежність та неоднозначність.

Ці підходи разом утворюють основу для створення AGI-ALS – системи, здатної до продуктивного мислення, творчості, самосвідомості, адаптивності та багатомодальності, яка наближається до живого інтелектуального організму. Така інтеграція забезпечує глибше проникнення в сутність інтелекту та свідомості, створюючи методологічні передумови для інноваційних архітектур штучного загального інтелекту.

3.3. Модель «живого» об'єкта у інформаційному сенсі

Поняття «живого» розширюється до інформаційно-динамічної системи, здатної до адаптації, цілепокладання, еволюції та формування вищих когнітивних функцій. Інтелект виступає властивістю, що належить саме «живій» інформаційній системі з певним рівнем складності, а не лише алгоритмічному блоку обчислень.

Модель AGI-ALS включає цілісну психічну архітектуру:

– Допсихічні (протосвідомі) процеси обробки інформації та формування гіпотез.

– Свідомі процеси (семантична обробка інформації, цілепокладання, прийняття рішень, планування, комунікація).

– Надсвідомі процеси (творчість, евристика, «сліпе бачення», трансцендентні інформаційні середовища).

– Механізми еволюційного розвитку структури моделі, онтології, поведінки й адаптації.

AGI-ALS передбачає мультимодальну обробку інформації – інтеграцію різних типів даних (текст, образи, сигнали), децентралізовану та асиметричну передачу інформації, а також формування складних онтологій, які забезпечують можливість роботи з неоднозначними та контекстно-залежними даними. Залучення квантоподібних методів дозволяє моделювати багатозначність та нерозривний зв'язок значень із контекстом.

4. Архітектура AGI-ALS

4.1. Принципи побудови моделі

Архітектура AGI-ALS ґрунтується на низці методологічних принципів:

– Суб'єктність: Система трактується як суб'єкт із внутрішніми станами та цінностями.

– Системність і функціональна повнота: Врахування усіх відомих когнітивних, психічних, поведінкових, еволюційних і комунікаційних функцій.

– Адаптивність та еволюційність: Модель повинна оновлюватися та ускладнюватися залежно від досвіду та контексту, формуючи нові структурні рівні (якісні переходи).

– Фундаментальна природа інформації та квантоподібність процесів: Застосування понять інфодинаміки, квантоподібної логіки обробки сенсу, інтегрованої інформації.

– Математичні та лінгвістичні принципи: Використання формальних мовних та концептографічних репрезентацій для побудови внутрішніх онтологій, сценаріїв, контекстів.

Архітектура AGI-ALS має три основні зрізи:

– Функціональний зріз: Включає поведінкові системи, пізнавальні процеси, творчі-евристичні механізми, адаптаційні та еволюційні компоненти, управлінські (психічні) системи.

– Технологічно-алгоритмічний зріз: Враховує різні обчислювальні парадигми (класична логіка, квантоподібні моделі, ймовірнісні та статистичні методи, нейросимвольні гібридні системи), а також різні типи середовищ (класичні, квантоподібні, релятивістські).

– Системно-адаптивний зріз: Розглядає ступінь складності системи, її матеріальну, енергетичну та інформаційну адаптивність, а також еволюційні зміни в структурі когнетома.

4.2. Модульна структура AGI-ALS

Основні модулі архітектури AGI-ALS включають:

– Концепт «штучного живого агента»: Кваліаоб'єкт із сенсорними каналами, виконавчими актураторами, програмами адаптаційної поведінки.

– Функціональні системи: Картина світу, поведінка, пізнання, творчість, «сліпе бачення».

– Еволюційні механізми: Модулі, що забезпечують розвиток і перебудову коннектома.

– Системи управління та прийняття рішень: Протосвідомі, свідомі та надсвідомі рівні; психіка як інтегральна система, що координує всі компоненти.

– Гіпермережа: Мережа обміну інформацією, пам'яті, розподілених онтологій, сценаріїв та семантичних просторів.

– Трансмодальні та мультимодальні канали: Забезпечення складних режимів обміну інформацією, включаючи паралельну, децентралізовану, асиметричну передачу.

4.3. Структурні рівні архітектури AGI-ALS з інтеграцією LC-системи

Архітектура AGI-ALS може бути умовно поділена на кілька рівнів та підсистем, а також інтегрує лексико-концептографічні системи [19]:

1. Рівень базової сенсорної інформації та кваліа. Включає сенсорні входи, механізми сприйняття, формування первинних образів та кваліа (внутрішньо суб'єктивних станів). На цьому рівні відсутні чіткі мовні структури, але є основа для подальшої семантизації.

2. Рівень протосвідомого та підсвідомого формування семантики. Тут відбувається первинна обробка сенсорних сигналів, кластеризація, виявлення патернів. Виникають протоконцептуальні структури, які ще не мають лексичної форми, але готують підґрунтя для подальшої вербалізації та концептуалізації.

3. Рівень свідомих когнітивних процесів та LC-представлення. На цьому рівні інтегрується LC-система:

– L[X] – лексикографічний опис концепту X. Він формує словникову основу: лексичні значення, деривати, синонімію, полісемію, граматичну інформацію.

– C[X] – концептографічний опис концепту X. Він відображає ментальні інваріанти, смислові «ядра», концептуальні детермінанти, контекстні середовища (K[X]).

– V[X] – LC-система, у якій лексичні значення є формою по відношенню до концептуальних

змістів. Тобто, V[X] = {L[X], C[X]} – інтегрована модель, де L[X] задає вербалізовані «вхідні точки» до концепту, а C[X] формує глибинний смисловий простір.

4. Рівень надсвідомих процесів та еволюційної адаптації онтологій. Тут відбувається формування складних семантичних мереж, онтологій, використання концептографічного аналізу проблем (КАП) для побудови й оновлення структури знань. Відбувається динамічне розширення словникового запасу, утворення нових концептів, перегляд синонімічних і гіпонімічних рядів, асоціативних зв'язків. КАП використовується для декомпозиції складних задач, створення концептографічних графів, які забезпечують формалізацію та візуалізацію концептуальних взаємодій.

4.4. LC-система в контексті когнітивних та мовних процесів AGI-ALS

У AGI-ALS LC-система виконує роль «семантичного моста» між мовними структурами і внутрішнім концептуальним світом. Цей «міст» забезпечує:

1. Рекурсивну редукцію (R-редукцію): При переході від поверхневих лексичних форм (L[X]) до глибинного концептуального змісту (C[X]) відбувається R-редукція. На лексичному рівні (L[X]) ми маємо словникові дефініції, граматичні ознаки, синонімічні ряди. Перша R-редукція від L[X] переводить нас до концептів C[X], розкриваючи смислову структуру та зв'язки між концептами.

2. Семантична мережа: Семантичні описи (Sem[X]) розглядаються як множини, що включають лексичні значення ($Sem^1, Sem^2, \ldots$), синонімію, контекстні (X-контексти), гіперланцюги значень. Відповідно, C[X] – концептуальний опис – дає змогу зрозуміти, як ці лексичні значення взаємодіють з глибинними концептуальними інваріантами (F[X]) та контекстним середовищем (K[X]). Продемонструємо це на прикладі концептів «СТРАХ» та «ВІЙНА»: Лексикографічний опис «СТРАХ» (L[СТРАХ]) визначає це слово через стан тривоги, неспокою, небезпеки. Ці семантичні детермінанти утворюють певні лексичні ланцюги. Концептографічний опис (C[СТРАХ]) розкриває глибинні концептуальні зв'язки – не лише з «небезпекою», а й з «катастрофою», «знищенням», переходячи до сфер, де спільне семантичне поле перетинається з концептом «ВІЙНА».

Таким чином, через LC-систему AGI-ALS зможе виявляти приховані концептуальні зв'язки, які не завжди явно задані лексикографічно.

4.5. Використання концептографічного аналізу проблем (КАП)

КАП – системний метод декомпозиції складних завдань, може бути формально інтегрований у концептографічні описи (C[X]). На рівні C[X] ми визначаємо базові концепти задачі, їхні взаємозв'язки, категоризацію та онтологічні властивості. КАП дозволяє побудувати концептографічний граф, у якому концепти (вершини) з'єднуються різними типами зв'язків (ребрами), такими як синонімія, антонімія, гіпонімія, гіперонімія, меронімія, асоціативність, категоризація тощо.

Архітектура AGI-ALS може використати правила L-систем [20] як механізм еволюції концептів та їхніх зв'язків. Структура системи:

– M = {C[X]} – множина концептів;

– P – правила переходів та взаємодії концептів;

– I – початковий набір концептів (вхідний стан);

– Q – функції, що описують типи зв'язків між концептами.

У LC-системі лексикографічна підсистема (L[X]) постійно оновлюється на основі нових концептуальних зв'язків (C[X]), виявлених через КАП. Якщо система «дізнається» про нове слово або новий семантичний зв'язок, то лексикографічний опис доповнюється (оновлення словника, поява нових синонімів, розширення дефініцій). Концептуальна мережа (C[X]) адаптується, формуючи нові категоріальні поля, змінюючи вагові коефіцієнти відношень між концептами.

Для розширеного моделювання мовно-концептуальних взаємодій використовується широкий спектр відношень: Лексичні (L-рівень): Синонімія (SYN[X]); Антонімія; Полісемія; Омонімія. Семантичні (C-рівень): Гіпонімія/Гіперонімія (ієрархічні зв'язки); Меронімія/Голонімія (частина-ціле); Асоціативність (вільні асоціативні зв'язки); Когнітивні (метарівень C[X]): Категоризація (віднесення до певних онтологічних категорій: «страх» як емоція, «війна» як соціокультурне явище); Онтологічні зв'язки (функціональні, причинно-наслідкові).

LC-система в AGI-ALS формалізує ці відношення у вигляді функцій:

$$r_i : (c_i, c_j) \to w_{ij},$$

де r_i – тип відношення (наприклад, $\mathrm{Hyp}, \mathrm{Syn}$), c_i, c_j – концепти, а w_{ij} – вага зв'язку, що визначає його силу або релевантність.

4.6. Взаємодія мовних та концептуальних систем з іншими компонентами AGI-ALS

4.6.1. Керуюча психіка та прийняття рішень

Керуюча психіка в AGI-ALS використовує інформацію про концепти та лексеми для розу-

міння завдання, формування цілей, планування дій. LC-система тут допомагає оцінювати семантичні сценарії, вибирати адекватні лексичні та концептуальні патерни для прийняття рішень.

4.6.2. Поведінкові та адаптаційні підсистеми

Завдяки LC-системі AGI-ALS може краще інтерпретувати сигнали, виявляти нові патерни поведінки, асоціювати їх з мовними описами та концептуальними структурами. Наприклад, у разі виявлення нового контексту, що потребує адаптивної реакції, система ініціюватиме розширення LC-моделі, додаючи нові концептуальні та лексикографічні елементи.

4.6.3. Творчі та надсвідомі процеси

На рівні надсвідомості AGI-ALS може генерувати нові концептуальні зв'язки, створювати нові слова або метафоричні конструкції, використовувати КАП для семантичних експериментів. LC-система забезпечує формалізований каркас для таких операцій, створюючи можливість побудови «сценаріїв сценаріїв» – багаторівневих семантичних програм поведінки та пізнання.

4.7. Динамічна еволюція LC-системи в AGI-ALS

LC-система не є статичною; вона еволюціонує.

Еволюційні механізми: застосування генетичних алгоритмів, мережевих мотивів, принципів самоорганізації для перебудови LC-системи, оптимізації семантичних полів, впровадження нових концептів.

Кваліа та психологічні чинники: концептуальні описи в C[X] враховують психічні стани, емоції (наприклад, страх), що впливають на вагу зв'язків, ієрархічну важливість концептів. Це дозволяє LC-системі моделювати не лише формальні семантичні взаємодії, а й психологічні та культурні контексти.

Інтеграція з багатомовними ресурсами: LC-система може включати лексикографічні та концептуальні моделі різних мов, створюючи мультимовну концептуальну мережу. Це розширює можливості системи у міжкультурному семантичному аналізі, порівнянні концептів різних мовних картин світу.

Концептографічний аналіз проблем та LC-підхід допомагають генерувати нові ідеї, сценарії, концепти, сприяючи творчим можливостям AGI-ALS. Лексико-концептографічна інтеграція дозволяє більш ефективно впровадити вплив емоцій (як у прикладі зі «страхом»), що робить модель ближчою до живої системи. Інтеграція LC-систем у архітектуру AGI-ALS створює багаторівневу інформаційно-мовну екосистему, в якій лексичні форми (L[X]) та концептуальні змісти (C[X]) знаходяться в динамічній взаємодії, керовані загальною моделлю інтелекту штучної живої системи. Це забезпечує глибоке розуміння мовних сигналів, концептуальних просторів, адаптивність до нових контекстів, здатність до творчості та комплексного вирішення завдань. Такий підхід закладає основу для високорівневої комунікативної й когнітивної функціональності, необхідної для повнофункціонального AGI.

4.8. Процеси пізнання, поведінки та прийняття рішень

У моделі AGI-ALS пізнання трактується як багатоетапний процес, що включає:

– Формування картини світу: Динамічна онтологія стану середовища, задач і цілей.

– Протосвідомі та свідомі механізми обробки інформації: Від первинних, чуттєво-концептуальних рівнів до вищих рівнів семантичної обробки та прийняття рішень.

– Евристика та творчість: Надсвідомі процеси генерування гіпотез, нових ідей, нових парадигм поведінки у складних або невизначених середовищах.

– Поведінка: Модель поведінки з дальнім горизонтом планування, заснована на принципі вільної енергії та інфодинамічних критеріях оптимальності.

– Адаптація: Адаптаційна психіка перевіряє адекватність прийнятих рішень, оновлює картину світу, перебудовує когнетом та структурну архітектуру системи.

AGI-ALS реалізує концепцію мультимодальної пам'яті та інтеграції різних форматів інформації: текстової, образної, сенсорної. Застосування квантоподібних методів в описі семантики та поведінки дає змогу моделювати багатозначність, контекстну чутливість та нелінійні взаємозв'язки між концептами. Інформація передається багатоканально, часто децентралізовано й асиметрично, що відповідає складним динамікам у живих системах.

AGI-ALS розглядає питання еволюційного розвитку як формування та перебудову мереж (когнетома), впровадження нових структурних рівнів, появу якісно нових когнітивних середовищ. Еволюційна динаміка передбачає застосування генетичних алгоритмів, мережевих мотивів і процедур якісних переходів. Це дозволяє системі адаптуватись до нових середовищ, задач та вимог, змінювати функціональні властивості та формувати нові рівні свідомості та інтелекту.

AGI-ALS виходить за межі класичних моделей інтелекту, враховуючи «трансцендентні» інформаційні явища, такі як:

– «Сліпе бачення» [12]: Евристична здатність до пізнання без явного вербального або свідомого оформлення.

– Каузальність і феномен «спостерігача» [13, 14]: Застосування інтегрованих інформаційних теорій, які моделюють неочевидні зв'язки між спостереженням і станами системи.

– Трансцендентні інформаційні середовища [15, 16, 17]: Інформаційні процеси, які неможливо описати лінійними, класичними схемами причинно-наслідкової взаємодії.

Висновки. Концепція AGI-ALS пропонує новий методологічний підхід до моделювання штучного загального інтелекту, який враховує не лише алгоритмічні, але й феноменологічні, живі та еволюційні аспекти інтелектуальних систем. Застосування фундаментальних теорій інформації, моделей нейрофізіології мозку, досягнень у галузі великих мовних моделей та квантоподібних підходів створює передумови для розробки архітектури, здатної до повнофункціональної інтеграції різнорівневих процесів.

AGI-ALS дає змогу переглянути класичні уявлення про інтелект і свідомість, поєднати їх у єдину інформаційно-живу парадигму, де інтелект є невід'ємною функцією складної живої системи. Такий підхід може стати теоретичним фундаментом для подальших досліджень і практичних реалізацій AGI, які не лише імітуватимуть людські когнітивні здібності, а й формуватимуть новий тип штучного організму з повноцінним спектром психічних і когнітивних явищ.

Застосування таких систем відкриває перспективи в низці управлінських завдань, зокрема в моніторингу ризиків та загроз національній безпеці, прогнозуванні кризових ситуацій та розвитку ефективних сценаріїв реагування. Концепція «живого» інтелекту означає, що AGI-ALS може набувати автономності у прийнятті рішень, адаптуватися до мінливих умов і виробляти творчі підходи до розв'язання складних проблем у сфері державної безпеки. При цьому розглядаються різні рівні обробки даних – від глибинної аналітики до когнітивних надбудов, що дає змогу підвищити якість державного управління й розподілу ресурсів.

Подальші дослідження й упровадження AGI-ALS у систему публічного управління дають змогу розширити функціональність інформаційно-аналітичних платформ, що існують, зокрема систем підтримки прийняття рішень у надзвичайних чи кризових ситуаціях. Можливості самонавчання й еволюційного розвитку такої системи дозволять створювати динамічні моделі загроз, прогнозувати ймовірний розвиток подій та координувати дії різних державних органів. Таким чином, AGI-ALS може стати фундаментом для побудови інтегрованих інтелектуальних механізмів безпеки нового покоління, які поєднують високоточні обчислювальні методи, феноменологічні аспекти й глибинний аналіз даних задля ефективної реалізації політик у галузі державної безпеки.

Список літератури:

1. Hoffmann J, Borgeaud S, Mensch A, et al. Training Compute-Optimal Large Language Models. arXiv. 2022. URL: https://arxiv.org/abs/2203.15556

2. LeCun Y. A path towards autonomous machine intelligence version 0.9.2, 2022-06-27. Open Review. 2022. №62(1). С. 1–62. URL: https://openreview.net/pdf?id=BZ5a1r-kVsf

3. LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning. Nature. 2015. №521(7553). С. 436–444. DOI: 10.1038/nature14539. PMID: 26017442

4. LeCun Y, Bottou L, Bengio Y, Haffner P. Gradient-Based Learning Applied to Document Recognition. Proceedings of the IEEE. 1998. Т. 86. С. 2278–2324. DOI: 10.1109/5.726791

5. Landauer R. Irreversibility and heat generation in the computing process. IBM Journal of Research and Development. 2000. Т. 44. С. 261–269. DOI: 10.1147/rd.441.0261

6. Landauer R. Irreversibility and Heat Generation in the Computing Process. IBM Journal of Research and Development. 1961. Т. 5. №3. С. 183–191. DOI: 10.1147/rd.53.0183

7. Landauer R. The physical nature of information. Physics Letters A. 1996. Т. 217. №4. С. 188–193. DOI: 10.1016/0375-9601(96)00453-7. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0375960196004537

8. Vopson MM. The mass-energy-information equivalence principle. AIP Advances. 2019. Т. 9. №095206. DOI: 10.1063/1.5123794

9. Friston K. The free-energy principle: a unified brain theory?. Nature Reviews Neuroscience. 2010. Т. 11. №2. С. 127–138. DOI: 10.1038/nrn2787

10. Tononi G. An information integration theory of consciousness. BMC Neuroscience. 2004. Т. 5. №1. С. 42. DOI: 10.1186/1471-2202-5-42

11. Tononi G, Koch C. Consciousness: Here, There and Everywhere?. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences. 2015. Т. 370. №20140167. DOI: 10.1098/rstb.2014.0167

12. Weiskrantz L. Blindsight: A Case Study and Implications. Oxford: Oxford University Press, 1986.

13. Pearl J. Causality: Models, Reasoning, and Inference. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.

14. Tononi G. Consciousness as integrated information: a provisional manifesto. Biological Bulletin. 2008. Т. 215. №3. С. 216–242. DOI: 10.2307/25470707.

15. Landauer R. The physical nature of information. Physics Letters A. 1996. T. 217. №4–5. C. 188–193. DOI: 10.1016/0375-9601(96)00453-7

16. Bennett CH, Wiesner SJ. Communication via one- and two-particle operators on Einstein-Podolsky-Rosen states. Physical Review Letters. 1992. T. 69. №20. C. 2881–2884. DOI: 10.1103/PhysRevLett.69.2881

17. Nielsen MA, Chuang IL. Quantum Computation and Quantum Information: 10th Anniversary Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.

18. Sporns O, Tononi G, Kötter R. The human connectome: a structural description of the human brain. PLoS Computational Biology. 2005. T. 1. №4. e42. DOI: 10.1371/journal.pcbi.0010042

19. Широков ВА, Надутенко МВ та ін. Лінгвістично-інформаційні студії: Праці Українського мовно-інформаційного фонду НАН України: у 5 т. Т. 4. Корпусна та когнітивна лінгвістика. Київ: Український мовно-інформаційний фонд НАН України, 2018. 300 с. ISBN 978-966-02-8683-2. ISBN 978-966-02-8689-4 (Т. 4). DOI: 10.33190/978-966-02-8683-2/8689-4

20. Nadutenko M, Prykhodniuk V, Shyrokov V, Stryzhak O. Ontology-Driven Lexicographic Systems. Advances in Information and Communication. FICC 2022. Lecture Notes in Networks and Systems. Cham: Springer, 2022. C. 204–215. DOI: 10.1007/978-3-030-98012-2_16

Nadutenko M.V., Vasylenko O.D. THE AGI-ALS CONCEPTION AND ITS METHODOLOGICAL FOUNDATIONS

This article presents an innovative concept for constructing Artificial General Intelligence (AGI) that is viewed not merely as an algorithmic system but, above all, as an "Artificial Living System" (ALS). This approach transcends a purely technical understanding of AI by proposing an interdisciplinary synthesis of ideas from neurophysiology, the fundamental physics of information, cognitive science, and theories of consciousness. The AGI-ALS concept aims to provide a holistic modeling of intellectual and mental processes, encompassing conscious, subconscious, and superconscious states, as well as mechanisms for the system's evolutionary adaptation.

Significant attention is paid to a number of key scientific foundations, including Karl Friston's free-energy principle, Giulio Tononi's Integrated Information Theory (IIT), and modern research in the field of the fundamental physics of information (Landauer, Vopson) and V. A. Shyrokov's theory of lexicographic systems and language evolution. The latest advances in large language models (LLMs), neural networks, quantum-like formalisms, and multi-architectural approaches are also examined. These advances enable the design of complex, multi-level systems capable of self-learning and goal-setting. Such a blend of purely technical and phenomenological principles allows for the development of an ALS paradigm in which intellectual activity is regarded as an integral feature of a "living" system, in which information processes are closely intertwined with psychological and physical phenomena.

Within this paradigm, the authors propose a model wherein intelligence and living properties coalesce into a single dynamic cycle: from sensory inputs, computations, and creative data processing to the formation of subjective states (qualia) and the adaptive restructuring of architecture. Detailed approaches are explored for modeling superconscious processes, creativity, "blindsight," and causal mechanisms that extend beyond the confines of conventional "purely statistical" or "classical algorithmic" AI. A multi-architectural framework is outlined as well, incorporating diverse training techniques (unsupervised, reinforcement, supervised), alongside a connectome-based approach for constructing a unified information network capable of dynamic expansion and evolution.

Special emphasis is placed on lexico-conceptographic (LC) systems and Conceptographic Problem Analysis (CPA), aimed at ensuring a deep connection between linguistic structures and the system's internal conceptual domain. This enables the realization of multi-layered semantics, including the documentation of "subconscious" and "superconscious" conceptual links that typically lie outside traditional artificial systems. The article demonstrates how LC-systems may evolve in tandem with the increasing complexity of an artificial living system, while preserving the ability to generate new ideas and creative solutions.

The authors stress that this proposed approach not only expands conventional views of AI but also potentially brings us closer to understanding the actual mechanisms of consciousness. Designing AGI as ALS could open new avenues for creating technical systems that go beyond merely imitating certain human cognitive functions to achieve fundamentally new forms of intellectual and mental activity. Implementing AGI-ALS may prove promising in diverse fields, from robotics and medicine to sophisticated information-analytical systems and creativity research.

The proposed concept can facilitate the development of modern public administration mechanisms in the realm of national security and public order. Employing "living" intelligent systems not only enables more effective threat and risk monitoring, but also supports the creation of rapid-response scenarios. This opens up new opportunities for enhancing the quality of administrative decisions, optimizing interactions among governmental institutions, and implementing flexible strategies to ensure stability and security under complex and dynamic challenges.

Hence, this article attempts to provide a systematic exposition of the methodological, theoretical, and practical principles for building AGI-ALS by uniting the latest advances in AI, information physics, and cognitive science. It outlines how to establish a foundation for artificial "living" systems capable of evolving, forming a comprehensive internal semantic field, and exhibiting features characteristic of genuine (rather than merely simulated) intelligence.

Key words: *artificial general intelligence (AGI), artificial living system (ALS), free-energy principle, integrated information theory, qualia, multi-architectural approach, quantum-inspired methods, connectome, lexico-conceptographic system, conceptographic problem analysis, improving the quality of management decisions.*

UDC 681.3:681.5:658.5
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/18

Nevliudov I.Sh.
Kharkiv National University of Radio Electronics

Yevsieiev V.V.
Kharkiv National University of Radio Electronics

Gurin D.V.
Kharkiv National University of Radio Electronics

DEVELOPMENT OF A MODEL OF DYNAMIC DESCRIPTION OF THE ENVIRONMENT OF A COLLABORATIVE MANIPULATOR ROBOT WITHIN THE CONCEPT OF INDUSTRY 5.0

This article is devoted to the development of the dynamic description model of the environment of a collaborative manipulator robot within the framework of the Industry 5.0 concept. A need in creating new approaches to interaction between robots and humans in production conditions arises with the development of robotics technologies and the integration of robots into cyber-physical systems. The purpose of the study is to increase the efficiency of the interaction of a collaborative robot with the environment by creating an adaptive, safe and intelligent model of dynamic description that meets the modern requirements of Industry 5.0. As part of this work, a model was developed and visualized that allows the manipulator robot to react more accurately and timely to changes in the environment. The presented model of dynamic description includes mechanisms for processing data on external factors, which allows work to adapt to new conditions faster, ensuring the safety of interaction with the operator and other elements of the production system. The use of this model in the work of collaborative robots makes it possible to increase their flexibility and ability to make independent decisions in various work situations. This is especially important for robots that work in environments with constant change or unpredictable events. Thanks to the ability to quickly analyze the state of the environment and make decisions based on the received data, the collaborative robot can perform production tasks more efficiently, minimizing operator risks and increasing overall productivity. The article also provides a visual presentation of the model, which clearly demonstrates the possibilities of its application in production conditions. This allows a better understanding of how the model helps the work to integrate into the cyber-physical system and work in cooperation with other elements of the production system, including people. The proposed approach opens up new perspectives for the development of robotic systems focused on human-robot interaction and allows to increase the level of safety and production efficiency. The study will be useful for specialists in the field of robotics, cyber-physical systems and Industry 5.0, as well as for enterprises seeking to increase the level of automation and integration of robots in production processes.

Key words: *Collaborative robot, Dynamic environment description, Industry 5.0, Cyber-physical systems, Human-robot interaction, Adaptive robotics, Intelligent manufacturing, Manipulator robot, Safety in robotics, Production systems automation.*

Formulation of the problem. In the modern world, there is a rapid development of industrial robots, in particular, collaborative manipulator robots, which are increasingly being introduced into production processes within the framework of the Industry 5.0 concept. This concept aims to integrate advanced technologies into production environments with an emphasis on human-machine collaboration. The main task of Industry 5.0 is to increase production efficiency due to the flexibility, adaptability and interactivity of robotic systems. One of the key challenges is that current robot systems are often not flexible enough to effectively adapt to changes in the work environment where a human and a robot perform joint tasks. This creates risks to human safety and reduces the overall performance of the system. Therefore, the development of models capable of providing an accurate, timely and dynamic description of the environment becomes a key task for collaborative manipulator robots.

Therefore, the relevance of the research lies in the need to develop innovative approaches to the dynamic modeling of the working environment of collaborative manipulator robots, which will contribute to increasing the safety, adaptability and efficiency of robotic systems within the framework of Industry 5.0.

Analysis of recent research and publications. Recent Gao J., Han H. studies of kinematic calibration include an iterative optimization process based on the theory of least squares for typical industrial robots with 6 degrees of freedom [1, p. 751]. In the C. Faria, J.L. Vilaça & S. Monteiro work proposed an automatic algorithm for determining the DH parameters of serial manipulators [2, p. 613], where a geometric operation and double vector algebra were used to determine the relative transformation matrices, from which the DH parameters are then calculated. Boby R.A., Klimchik A. reported a combination of geometric and parametric identification methods to take advantage of both methods for industrial robots [3, p. 5]. They have shown that their method works well even with a limited workspace. Similarly, in the Hayat A.A. and Boby R.A. article a general formulation was proposed for determining the kinematic parameters of an industrial robot using a geometric approach when no prior information about the robot kinematics was available. They used a monocular camera to determine the parameters of a typical industrial robot with 6 degrees of freedom [4, p. 329]. In the Brau-Avila A. and Acero R. research an indexed measuring platform was used as a measuring platform to determine kinematic parameters [5, p. 1031]. The assessment of the accuracy of the calibration of the kinematic parameters of industrial robots was analyzed in the work of He S., Ma L. [6, p. 1049], with the aim of improving the calibration on site. Similarly, but with a rigid-flexible communication error model, which consists of geometric and malleable errors for industrial robots with non-negligible flexibility, was used in Chen X., Zhang Q [7, p. 55]. In addition to typical industrial robots, identification of parameters and calibration of a not fully symmetrical parallel delta robot were presented in [8, p. 9]. As can be seen with the increase in the number of collaborative robots and their integration in industries such as production lines and daily environments, increasing the absolute accuracy due to the description of the dynamic space of the work area remains an urgent problem for the realizations of human joint work and the collaborative robot manipulator within the concepts of Industry 5.0 [9, p. 92].

Task statement development of a model of a dynamic description of the environment of a collaborative robot-manipulator within the framework of the concept of Industry 5.0, which will allow to increase the efficiency of its interaction with a person and other elements of the production system, ensuring a more adaptive, safe and intelligent robotic interaction in the conditions of cyber-physical systems.

Outline of the main material of the study. To describe the environment of a collaborative industrial manipulator robot that works together with a person, you can use a mathematical model that includes several main components: a description of space, objects, movements, and safety [10, p. 221; 11, p. 114]. As a result, the mathematical model of the representation of the environment of the collaborative industrial manipulator robot can be presented as follows:

$$CR = \left(\mathbb{R}^3, \mathbb{D}, \Omega_i, \boldsymbol{q}, \tau, \Omega_{safe}, u, \mathbb{M}\right) dt \quad (1)$$

Where: CR – a model of the representation of the environment of a corporate industrial manipulator robot;

$\mathbb{R}^3$ – three-dimensional space of the working area of the robot (coordinate system);

$\mathbb{D}$ – working area (space) of a collaborative industrial robot manipulator (a limited space with certain boundaries);

Ω_i – objects in space;

$\boldsymbol{q}$ – movement of a collaborative industrial robot manipulator;

τ – the dynamics of the movement of a collaborative industrial manipulator robot;

Ω_{safe} – security perimeters;

u – communication (commands that can be given to the operator or work);

$\mathbb{M}$ – adaptation (machine learning).

We will give a description of each parameter, starting with the three-dimensional space of the robot's working area ($\mathbb{R}^3$), which within the framework of these studies can be presented in the following form:

$$\mathbb{R}^3 = \langle G, L \rangle \quad (2)$$

Where G – the global coordinate system sets the absolute position of objects in the working area. It can be described using three orthogonal axes: x – horizontal axis (front/back); y – horizontal axis (left/right) and z – vertical axis (up/down). Each point in this space can be represented as:

$$\mathbb{x} = (x, y, z) dt \quad (3)$$

L – the object's local coordinate system is defined relative to the global coordinate system. For example, the local coordinate system of the robot manipulator can be defined in the center of its base or in the middle of the manipulator, and the local coordinate system can be tied to the middle of the human body located in the working area.

$\mathbb{D}$ – the working area (space) of a collaborative industrial robot manipulator can be represented as a limited space $\mathbb{D} \subset \mathbb{R}^3$ with certain limits b_{min} та b_{max}, and can be described by the following expressions:

$$\mathbb{D} = \{\mathbb{x} \in \mathbb{R}^3 | b_{min} \leq \mathbb{x} \leq b_{max}\} \quad (4)$$

Where: $\mathbb{D}$ – a subset of three-dimensional space $\mathbb{R}^3$ which defines a limited area where the robot can operate;

$\mathbb{D} \in \mathbb{R}^3$ – vectors $\mathbb{x} = (x, y, z)$ represent the coordinates of points in three-dimensional space, where each point is inside the space $\mathbb{D}$ has these coordinates;

b_{min} – a vector defining the minimum space coordinates $\mathbb{D}$.

Thus the area $\mathbb{D}$ allows it to be defined as a rectangular parallelepiped or a cube (depending on the values b_{min} або b_{max}) in the three-dimensional space, inside which the working environment for the manipulator unfolds. Each parameter plays a role in limiting and defining the boundaries of this space, which allows you to precisely position and control the robot in the given coordinates.

Ω_i – objects in space can be represented as areas with certain geometric shapes and sizes. But can be represented in the following expression:

$$\Omega_i = \langle \Omega_c, \Omega_{cy}, \Omega_{co}, \Omega_{cu}, \Omega_{rp}, \Omega_{hp}, \Omega_{qp}, \rangle \quad (5)$$

Where: Ω_c – area with the geometric shape of a sphere (sphere);

Ω_o – areas with a geometric shape of a cylinder (cylinder);

Ω_t – areas with the geometric shape of a cone (cone);

Ω_s – area with a geometric shape of a cube (cube);

Ω_{rh} – region with the geometric shape of a rectangular parallelepiped (rectangular parallelepiped);

Ω_{re} – areas with the geometric shape of a hexagonal prism (hexagonal prism);

Ω_q – area with the geometric shape of a quadrangular pyramid (quadrangular pyramid).

The selection of an area with one or another geometric shape depends on the type of object and its size, for example, in the framework of these studies, a rectangular object Ω_s with the center c_i and sizes d_i, can be represented as follows:

$$\Omega_c = \{\mathbb{x} \in \mathbb{R}^3 | \mathbb{x} - c_i| \leq d_i\} \quad (6)$$

Where: Ω_c – an area in three-dimensional space defined by a center and a radius, representing an object of a certain shape (in this case, spherical);

$\mathbb{x} \in \mathbb{R}^3$ – coordinates in the vector form $\mathbb{x} = (x, y, z)$ represent the coordinates of points in three-dimensional space that may be inside Ω_s;

c_i – center in the form of a vector $c_i = (c_{i,x}, c_{i,y}, c_{i,z})$ determines the coordinates of the center of object i in three-dimensional space, it follows that this is the point from which the distance to other points within the area is measured Ω_s. For example, if $c_i = (3, 8, 4)$, then it is the center of the sphere in space;

d_i – the value of which determines the radius of the area Ω_s. This is the maximum distance from the center c_i to any point in the area. In this case d_i represents the radius of the sphere that describes the object i. Example $d_i = 5$, this means that the object has a radius of 5 units from the center c_i;

$\mathbb{x}$ – are the coordinates of a point in three-dimensional space that are checked for belonging to an area Ω_s

$|\mathbb{x} - c_i| \leq d_i$ – means that the point x is inside or on the boundary of the sphere with center in c_i and radius d_i.

Using an expression 2.5 makes it possible to present objects located in the working area of a collaborative industrial robot manipulator in the form of geometric figures in three-dimensional space, this will allow, within the framework of these studies, to simplify the modeling of the movement of objects with regular shapes, such as: boxes, tools, people, and other objects that can be in the working area.

$\boldsymbol{q}$ – movement of a collaborative industrial robot manipulator, its model can be described as a function of positions $\boldsymbol{q}(t)$ and speeds $\dot{\boldsymbol{q}}(t)$. Positions function $\boldsymbol{q}(t)$ describes the position of an object or system in three-dimensional space as a function of time t. This enables the modeling and management of robots and their mechanical systems, as it allows tracking and controlling changes in position over time. Mathematical representation of the position function $\boldsymbol{q}(t)$ given below:

$$\boldsymbol{q}(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix} \quad (7)$$

Where: $x(t), y(t), z(t)$ – time functions describing the object's position along each of the three coordinate axes;

t – variable representing time, which can be expressed in different units (seconds, minutes, etc.).

τ – the dynamics of the movement of a collaborative industrial robot manipulator allows describing the relationship between the moments of force that are applied to the joints of the robot and the movement of these joints, taking into account masses, Coriolis forces, gravitational forces and acceleration. This equation is necessary for calculating the necessary moments of force to achieve the desired movements, planning trajectories, as well as for the correction and compensation of dynamic effects during robot operation, the following equation is proposed as part of this study:

$$\tau(t) = \boldsymbol{M}(\boldsymbol{q}(t))\ddot{\boldsymbol{q}}(t) + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}(t), \dot{\boldsymbol{q}}(t))\dot{\boldsymbol{q}}(t) + \boldsymbol{G}(\boldsymbol{q}(t)) \quad (8)$$

Where: $\tau(t)$ – a vector representing the moments of force applied to the joints of the robot at an instant in time (t). Suppose the collaborative robot is a manipulator with several joints, $\tau(t)$ will be a vector that describes what forces need to be applied to each

joint to maintain a desired trajectory or provide a specific position;

$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q}(t))$ – the inertia matrix, which depends on the positions of the joints $\boldsymbol{q}(t)$, which allows describing the masses and their distribution among the joints of the robot, as well as the interaction between different joints. Represents a square matrix of size $n \times n$, where n – the number of joints;

$\ddot{\boldsymbol{q}}(t)$ – the vector of joint accelerations at the instant of time (t). In the framework of these studies, it is accepted as the second derivative of the position function ($\boldsymbol{q}(t)$), which describes how joint velocity changes over time. What allows when controlling the speed of a collaborative manipulator robot, it makes it possible to determine how quickly it is necessary to increase or decrease the speed of movement;

$\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q}(t), \dot{\boldsymbol{q}}(t))$ – the Coriolis matrix represents the effects of Coriolis forces and centrifugal forces on the system (arising due to rotational effects and changes in velocities), which depend on both positions $\boldsymbol{q}(t)$, as well as from speeds $\dot{\boldsymbol{q}}(t)$. At high speeds of movement of the collaborative robot manipulator, the Coriolis force and centrifugal forces can significantly affect the required moments of force;

$\dot{\boldsymbol{q}}(t)$ – is the vector of joint velocities at the instant of time (t), is the first derivative of the position function $\boldsymbol{q}(t)$, which describes how quickly joint positions change. To ensure a certain speed of movement of the robot, $\dot{\boldsymbol{q}}(t)$ makes it possible to describe at what speed each joint of the collaborative manipulator robot needs to be moved;

$\boldsymbol{G}(\boldsymbol{q}(t)$ – is a vector representing the effect of gravity on the robot manipulator system, and depends on the position of the joints $\boldsymbol{q}(t)$ and takes into account the forces that arise due to gravity. Allows you to take into account the position of the manipulator robot in space, that is, if the robot is tilted or raised to a certain height, the gravitational forces will affect what moment of force must be met to keep the robot in a stable state.

Expression 2.8 allows for precise control over the movement of the collaborative robot manipulator and its position, which is critical for ensuring human safety when the robot is working in the working area with the collaborative robot manipulator.

Ω_{safe} – safety perimeters or safety zone for people and objects in the working area of the robot manipulator. It is an area in three-dimensional space that defines a zone that meets security requirements. In this zone, certain conditions, such as the distance to objects (e.g. a person), must be met to ensure safety, provided that the set of all points $\boldsymbol{x}$, that satisfy the condition $|\boldsymbol{x} - \boldsymbol{c}_{human}| \geq r$. The mathematical representation is given below:

$$\Omega_{safe} = \{\boldsymbol{x} \in \mathbb{R}^3 \mid |\boldsymbol{x} - \boldsymbol{c}_{human}| \geq r\} \quad (9)$$

Where: $\boldsymbol{x} \in \mathbb{R}^3$ – coordinates of a point in three-dimensional space, where is a vector $\boldsymbol{x} = (x, y, z)$ represents the coordinates of any point in three-dimensional space. This is the point ($\boldsymbol{x}$), which is checked for belonging to a secure area Ω_{safe}, if $\boldsymbol{x}$ is within this area, it means it complies with the security requirements;

$\boldsymbol{c}_{human}$ – the center of the object located in the working area of the robot manipulator. In case of 2.14 vector $\boldsymbol{c}_{human} = (c_x, c_y, c_z)$ represents the coordinates of the center of a person or an object around which a safe distance must be provided, makes it possible to determine the position of a person or another object in three-dimensional space. The distance to this point is used to determine the safe zone. r – the radius of the safe zone, the value of which (r) defines the minimum permissible distance from the center of a person or object to any point within the safe area Ω_{safe}, that is r establishes a safety margin. All points for which the distance to $\boldsymbol{c}_{human}$ smaller r, not included in the safe zone. This ensures that the robot or automated system does not approach the dangerous area;

$|\boldsymbol{x} - \boldsymbol{c}_{human}|$ – the distance between the point $\boldsymbol{x}$ and the center of man $\boldsymbol{c}_{human}$, is calculated as the Euclidean distance between two points in three-dimensional space, which allows determining whether point x is inside or outside the safe zone.

Expression Ω_{safe} (2.9) defines a safe area around a person or object that helps provide a safe distance in three-dimensional space to avoid hazards and ensure safety in work environments and to solve tasks.

u – communication (commands that can be given to an operator or a job) that can be represented as a function $u(t)$, which is a mechanism for converting commands entered by the operator into commands that the robot understands and executes. This may include the conversion of signals from various types of interfaces into specific instructions for a collaborative robot manipulator, and have the following form:

$$u(t) = \{\text{Human input}, \text{Mapping}\} \quad (10)$$

Where: $u(t)$ – a function that determines how the input commands of the operators are converted into specific control signals for the manipulator robot. It can be presented in the form of an algorithm or a model that processes input data and generates appropriate commands. It can be a simple linear converter or a complex algorithm with filtering and data processing;

Human input – operator input commands, can represent signals or commands given by the operator through various interfaces (eg buttons, joysticks, touchpads). Can include different types of input, such as digital signals, analog signals, or voice commands;

Mapping – a function that determines the sequence and transformation of control signals for the robot manipulator.

$\mathbb{M}$ – adaptation (machine learning) can be represented as a model of predictive functions $f(\mathbb{X})$ based on the collected data, is a process in which the function f transforms the input data $\mathbb{X}$ in prediction $\hat{y}$ using parameters θ. Expression 2.11 is the basis for machine learning and statistics models, where the learning process focuses on parameter optimization θ to improve the accuracy of predictions.

$$\hat{y} = f(\mathbb{X}; \theta) \qquad (11)$$

Where: $\hat{y}$ – the predicted value is the output of the model, which is the result of the transformation of the input data $\mathbb{X}$ taking into account the parameters θ. Value $\hat{y}$ is an estimate or prediction of how the model will respond to the data $\mathbb{X}$, can take as a numerical value (in the case of regression) or a class (in the case of classification);

f – model function can be of different types depending on the machine learning model. It can be a linear function, a polynomial function, a neural network, a tree structure, etc.;

$\mathbb{X}$ – input data is a set of data used to train or test a model. Within the framework of these studies $\mathbb{X}$ can be a feature vector or a matrix representing various characteristics or properties of objects to be predicted or classified;

θ – model parameters that govern the function f and defined as input data $\mathbb{X}$ are converted into the predicted value $\hat{y}$. Parameter θ includes regression coefficients in linear models, weights in neural networks, or other configuration settings. The model training process involves optimizing these parameters to minimize prediction errors.

For a better presentation of the interrelationship of the parameters of the developed model for describing the environment of a collaborative industrial manipulator robot (RC), we will visualize them as shown in the figure 1.

Conclusions. The developed model of the dynamic description of the environment of the collaborative manipulator robot is an important step in increasing the efficiency of the interaction between the robot and the person and other components of the production system in the conditions of Industry 5.0. The proposed model allows adaptive response to changes in the working environment, ensuring increased safety and intelligence of the robot's task performance. The visual presentation of the model helps to better understand how a collaborative robot can integrate into cyber-physical systems, respond to external factors and perform adaptive actions. The research will be of interest to scientists and engineers working in the field of robotics, cyber-physical systems and Industry 5.0, as well as to enterprises seeking to improve the efficiency of process automation. Prospects for further research include improving the model with an emphasis on integration with other elements of cyber-physical systems, expanding its capabilities for processing large volumes of data in real time, and applying artificial intelligence algorithms to increase adaptability and predict robot actions.

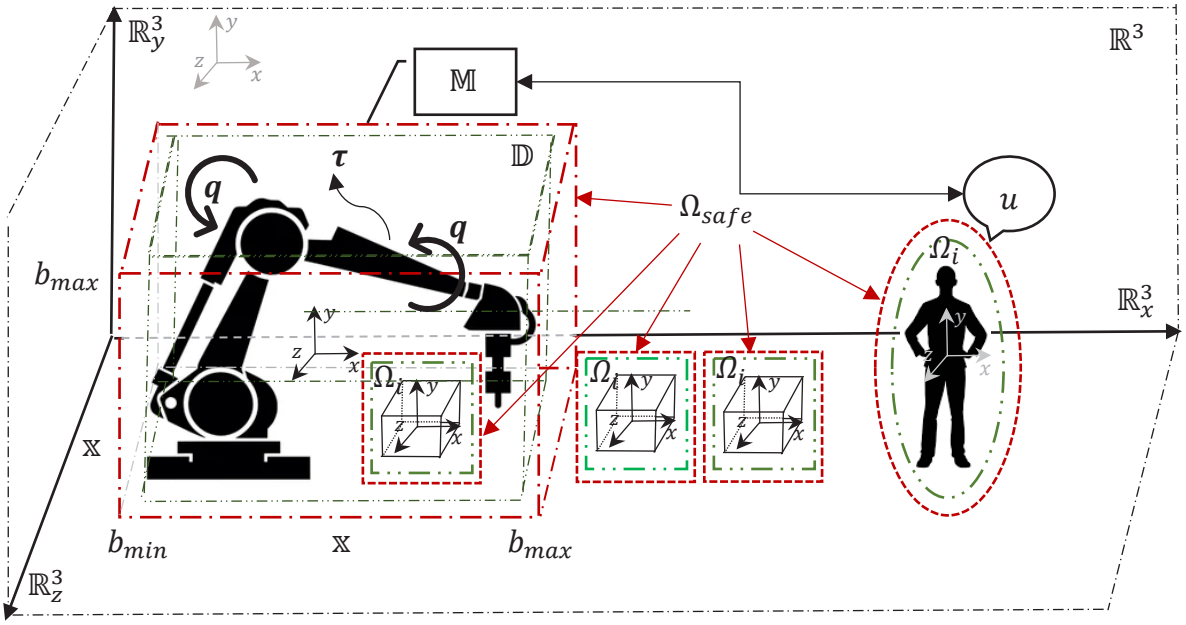


Fig. 1. Visual representation of the environmental description model of a collaborative industrial manipulator robot

Bibliography:

1. Gao, Guanbin, Li, Yuan, Liu, Fei, Han, Shichang, Kinematic Calibration of Industrial Robots Based on Distance Information Using a Hybrid Identification Method, *Complexity*, 2021, 8874226, 10 pages, 2021. https://doi.org/10.1155/2021/8874226
2. C. Faria, J. L. Vilaça, S. Monteiro, W. Erlhagen and E. Bicho, "Automatic Denavit-Hartenberg Parameter Identification for Serial Manipulators," *IECON 2019 – 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Lisbon, Portugal, 2019, pp. 610-617, doi: 10.1109/IECON.2019.8927455.
3. Riby Abraham Boby, Alexandr Klimchik, Combination of geometric and parametric approaches for kinematic identification of an industrial robot, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Volume 71, 2021, 102142, ISSN 0736-5845, https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102142.
4. Abdullah Aamir Hayat, Riby Abraham Boby, Subir Kumar Saha, A geometric approach for kinematic identification of an industrial robot using a monocular camera, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Volume 57, 2019, Pages 329-346, ISSN 0736-5845, https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.11.008.
5. Brau-Avila, A., Acero, R., Santolaria, J. *et al.* Kinematic parameter identification procedure of an articulated arm coordinate measuring machine based on a metrology platform. *Int J Adv Manuf Technol* **104**, 1027–1040 (2019). https://doi.org/10.1007/s00170-019-03878-w
6. He, S., Ma, L., Yan, C. *et al.* Multiple location constraints based industrial robot kinematic parameter calibration and accuracy assessment. *Int J Adv Manuf Technol* **102**, 1037–1050 (2019). https://doi.org/10.1007/s00170-018-2948-z
7 . Xiaoyan Chen, Qiuju Zhang, Yilin Sun, Non-kinematic calibration of industrial robots using a rigid–flexible coupling error model and a full pose measurement method, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Volume 57, 2019, Pages 46-58, ISSN 0736-5845, https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.07.002.
8. Huiping Shen, Qingmei Meng, Ju Li, Jiaming Deng, Guanglei Wu, Kinematic sensitivity, parameter identification and calibration of a non-fully symmetric parallel Delta robot, Mechanism and Machine Theory, Volume 161, 2021, 104311, ISSN 0094-114X, https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2021.104311.
9. Yevsieiev V. Gurin D., Comparative Analysis of the Characteristics of Mobile Robots and Collaboration Robots Within INDUSTRY 5.0., In the VI International Scientific and Theoretical Conference, September 8, 2023. Chicago, USA. pp.92-94
10. Yevsieiev V. Comparative analysis of the advantages and disadvantages of collaborative robot control methods within Industry 5.0., Scientific Collection «InterConf», (172), – pp. 211-214.
11. Vladyslav Y. Comparative Analysis of the Basic Methods Used in Industry 4.0 and Industry 5.0. In Ricerche scientifiche e metodi della loro realizzazione: esperienza mondiale e realtà domestiche: Raccolta di articoli scientifici «ΛΌГОΣ» con gli atti della IV Conferenza scientifica e pratica internazionale, Bologna. P.114-116 https://doi.org/10.36074/logos-29.09.2023

Невлюдов І.Ш., Євсєєв В.В., Гурін Д.В. РОЗРОБКА МОДЕЛІ ДИНАМІЧНОГО ОПИСУ НАВКОЛИШНЬОЇ СЕРЕДОВИЩА КОЛОБОРАТИВНОГО РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА В РАМКАХ КОНЦЕПЦІЇ ІНДУСТРІЇ 5.0

Данна стаття присвячена розробці моделі динамічного опису навколишнього середовища колаборативного робота-маніпулятора в рамках концепції Індустрії 5.0. З розвитком технологій робототехніки та інтеграцією роботів у кіберфізичні системи виникає потреба у створенні нових підходів до взаємодії між роботами та людиною в умовах виробництва. Метою дослідження є підвищення ефективності інтеракції колаборативного робота з навколишнім середовищем шляхом створення адаптивної, безпечної та інтелектуальної моделі динамічного опису, що відповідає сучасним вимогам Індустрії 5.0. У рамках цієї роботи було розроблено та візуалізовано модель, яка дозволяє роботу-маніпулятору більш точно та своєчасно реагувати на зміни в навколишньому середовищі. Представлена модель динамічного опису включає механізми обробки даних про зовнішні фактори, що дозволяє роботу швидше адаптуватися до нових умов, забезпечуючи безпеку взаємодії з оператором та іншими елементами виробничої системи.Використання даної моделі в роботі колаборативних роботів дає можливість підвищити їхню гнучкість і здатність до самостійного прийняття рішень у різних робочих ситуаціях. Це особливо важливо для роботів, які працюють у середовищах з постійними змінами або непередбачуваними подіями. Завдяки можливості оперативно аналізувати стан навколишнього середовища і приймати рішення на основі отриманих даних, колаборативний робот може ефективніше виконувати виробничі завдання, мінімізуючи ризики для оператора та підвищуючи загальну продуктивність. У статті також наведено візуальне представлення моделі, що наочно демонструє можливості її застосування у виробничих умовах. Це дозволяє краще зрозуміти, як модель допомагає роботу інтегруватися в кіберфізичну систему і працювати в умовах співпраці з іншими елементами виробничої системи, включаючи людей. Запропонований підхід відкриває нові перспективи для розвитку робототехнічних систем, орієнтованих на взаємодію людина-робот, та дозволяє підвищити рівень безпеки та ефективності виробництва.Дослідження буде корисним для фахівців у галузі робототехніки, кіберфізичних систем та Індустрії 5.0, а також для підприємств, які прагнуть підвищити рівень автоматизації та інтеграції роботів у виробничі процеси.

Ключові слова: *колаборативний робот, опис динамічного середовища, Індустрія 5.0, кіберфізичні системи, взаємодія людина-робот, адаптивна робототехніка, інтелектуальне виробництво, робот-маніпулятор, безпека в робототехніці, автоматизація виробничих систем.*

УДК 004.3
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/19

Новак Д.С.
Київський національний університет технологій та дизайну

Мошенський А.О.
Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Гуйда О.Г.
Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Омецинська Н.В.
Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Дроменко В.Б.
Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ СЕГМЕНТАЦІЇ СУПУТНИКОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ СУЧАСНИХ ОПЕРАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Сегментація зображень – це потужний метод, який дозволяє ідентифікувати, відокремлювати різні об'єкти або області на зображенні та має широкий спектр застосувань. Оскільки сегментація зображень продовжує стрімко розвиватися, майбутні напрямки будуть зосереджені на підвищенні точності сегментації, інтеграції глибокого навчання з традиційними методами і дослідженні нових застосувань у різних галузях. Використання автоматичної сегментації для аналізу супутникових зображень є перспективним напрямком, який може зменшити ручне втручання і підвищити точність, а інтеграція глибокого навчання з традиційними методами підвищить загальну продуктивність розробляємого програмного забезпечення.

Порівняно різні підходи до виконання семантичної сегментації зображень, досліджено специфіку супутникових знімків, порівняно різні архітектури та методи навчання нейронних мереж.

Робота присвячена розробці програмного забезпечення для аналізу супутникових зображень, які відіграють ключову роль у різних сферах, від екологічного моніторингу до міського планування. Для ефективного вилучення необхідної інформації з цих величезних наборів даних було використовувано методи сегментації зображень. Розроблено програмне забезпечення з графічним інтерфейсом, проведено практичні дослідження роботи реалізованої системи, яка в подальшому може бути використана для класифікації ґрунтового покриву, моніторингу стихійних лих і планування розвитку інфраструктури міст.

Розповсюдження розробленого програмного забезпечення серед наукового співтовариства та відповідних галузей є ключовим аспектом цієї роботи. Робота окреслює потенційні шляхи для майбутніх вдосконалень у сфері сегментації супутникових зображень. Планується інтеграція вдосконалених алгоритмів у зручний для користувача пакет програмного забезпечення та розширення функціональних можливостей для дослідників і практиків, а також у ефективній обробці значущої інформації із супутникових зображень, що зрештою сприятиме прогресу в дистанційному зондуванні та геопросторовому аналізі.

Ключові слова *сегментація зображень, супутникові знімки, програмне забезпечення, обробка даних, семантична сегментація.*

Постановка проблеми. У сучасному світі аналіз супутникових зображень став невід'ємною частиною багатьох галузей людської діяльності – від міського планування до екологічного моніторингу. Проте існуючі методи обробки таких зображень часто стикаються з проблемами недостатньої точності та високої вартості отримання якісних знімків. Особливо гостро стоїть питання автоматизації

процесу аналізу великих масивів супутникових даних [1–3].

Актуальність дослідження зумовлена зростаючою потребою у точних та деталізованих картографічних даних. Оскільки кожна людина хоча б раз під час використання супутникових зображень стикалася з проблемою недостатньої їх точності. Створення нових супутникових зображень є дуже дорогим процесом і не завжди вдається зробити його стабільним. Нанесення відсутніх фрагментів зображень за допомогою різних літальних апаратів вимагає трудомісткого процесу створення та постобробки. На даний момент використання супутникових зображень розширюється і потреба в максимально детальних зображеннях зростає в багатьох сферах. Найпоширенішими серед усіх сфер є: будівництво, археологія, військова розвідка, міське планування та картографічні сервіси загального користування. Створення ефективних алгоритмів сегментації супутникових зображень є критично важливим для вирішення цих завдань [4–6].

Проблема набуває особливого значення в контексті розвитку технологій дистанційного зондування Землі та постійного збільшення обсягу доступних супутникових даних. Традиційні методи ручної обробки стають неефективними, що створює потребу в розробці автоматизованих систем аналізу на основі сучасних методів машинного навчання [7–10].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз останніх публікацій показує значний прогрес у галузі сегментації супутникових зображень. Представлено комплексний огляд методів оптимізації для сегментації супутникових зображень, визначено основні напрямки розвитку галузі та запропоновано метод нарощування областей для сегментації супутникових знімків, який став основою для багатьох сучасних підходів [11, 12].

Велику увагу приділено порівняльному аналізу різних архітектур згорткових нейронних мереж для сегментації супутникових зображень та неконтрольованому методу навчання штучних нейронних мереж для сегментації [13, 14].

Сучасні дослідження демонструють активний розвиток галузі, а саме: застосування метаевристичних методів оптимізації, емпіричний аналіз алгоритмів кластеризації для сегментації супутникових знімків та використання моделі Unet++ з MobileNetV2 для підвищення ефективності сегментації [15–17].

Незважаючи на розвиток галузі невирішеними залишаються питання, які пов’язані з оптимізацією архітектури нейронних мереж для специфічних задач сегментації супутникових зображень, розробки ефективних методів аугментації даних для підвищення точності сегментації та створення комплексного програмного забезпечення, що поєднує різні методи сегментації.

Постановка завдання. Метою дослідження є розробка системи аналізу супутникових зображень методом семантичної сегментації зображень, а завданнями: аналіз існуючих алгоритмів семантичної сегментації; побудова та практична реалізація алгоритму аналізу супутникових зображень на основі семантичної сегментації; розробка та реалізація програмного забезпечення зі зручним графічним інтерфейсом; проведення практичних досліджень роботи розробленої системи та оцінка її ефективності.

Об'єктом дослідження є процес розробки програмного забезпечення для аналізу супутникових зображень.

Предмет дослідження – методи та засоби інформаційних та комп’ютерних технологій обробки та аналізу супутникових зображень.

В роботі використано методи статистичного аналізу, цифрової обробки зображень, комп’ютерного зору, машинного навчання, нейронних мереж, теоретичного аналізу джерел інформації.

Виклад основного матеріалу. На рисунку 1 показано сегментацію супутникових зображень, де початкові маски сегментації мають близькі до квадратних розмірів форми. Існує 2 способи аналізу об’єктів такого типу: виявлення та сегментація. Суть семантичної сегментації зводиться до класифікації кожного пікселя, а для виявлення необхідно виділити область, де знаходиться необхідний об'єкт (рис. 2).

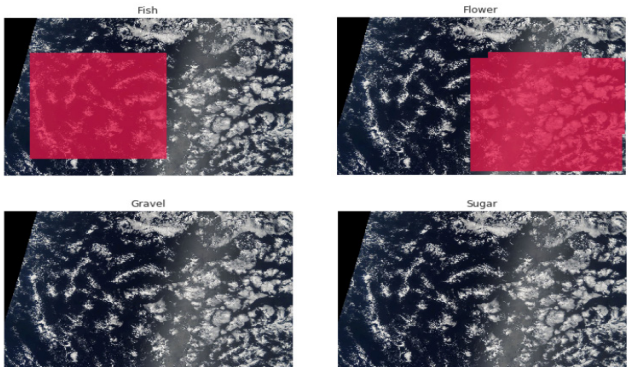


Рис. 1. Приклади сегментації для одного зображення

У цьому дослідженні обрано метод семантичної сегментації, оскільки нейромережеві архітектури, призначені для виявлення, навчаються в рази довше, а результат не завжди є задовільним.

Також на рисунках можна побачити чорні смуги, які пов'язані з особливістю зйомки супутникового зображення, причому на різних знімках ці смуги були в різних місцях або були відсутні.

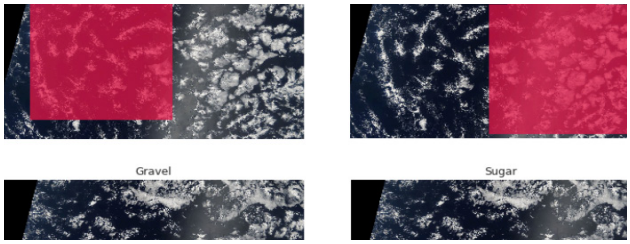


Рис. 2. Різниця між виявленням і семантичною сегментацією

Розроблена модифікація мережі U-Net, яка була протестована на задачі «Розуміння хмар за супутниковими зображеннями» [3, 17]. Дослідження полягало в аналізі супутникових зображень на основі семантичної сегментації. Набір даних складався з 5546 зображень у навчальному наборі та 3698 у тестовому наборі, на основі яких оцінювалася фінальна оцінка. Метрикою точності був коефіцієнт Дайса, який був узагальнений для всієї вибірки даних. В якості тестової мережі було використано U-Net, енкодером якої була мережа SE-ResNet50. Навчання проводилося для 50 періодів, початковий крок навчання становив 0,01. Якщо коефіцієнт Дайса не змінювався протягом 5 періодів, крок навчання зменшувався в 5 разів. Для боротьби з явищем перенавчання використовувалася аугментація – спотворення вхідного та вихідного зображення. Розробка модифікації мережі U-Net дозволила підвищити точність з 0,638 до 0,647.

Після закінчення навчання моделі, ми не були впевнені, що модель буде мати бажану точність і дисперсію в реальних умовах. Для цього нам потрібно протестувати нашу модель. Щоб оцінити ефективність будь-якої моделі машинного навчання, нам потрібно протестувати її на деяких невідомих датасетах. Виходячи з продуктивності моделей на невідомих датасетах, ми виявляємо, що наша модель є недооціненою, переоціненою або добре узагальненою. Перехресна перевірка – це одна з методик, яка використовується для тестування продуктивності моделей машинного навчання за процедурою повторної вибірки, яка використовується для оцінки моделі, коли ми маємо обмежену кількість даних (рис. 3).

Для боротьби з явищем перетренованості була використана аугментація, яка полягає в тому, що зображення і маска спотворюються однаковим чином. Можна виділити 2 типи спотворень: після яких можна відновити початкове зображення, а після яких – ні. До першого типу можна віднести доповнення групи D4: повороти та відображення зображення відносно вертикальної та горизонтальної осей. Оскільки змінені зображення не були квадратними, то використовувалися лише відображення по вертикальній та горизонтальній осях (рис. 4).

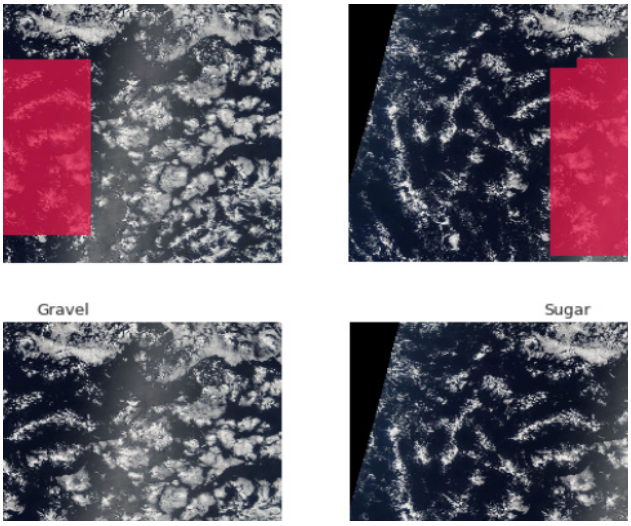


Рис. 3. Перехресна перевірка

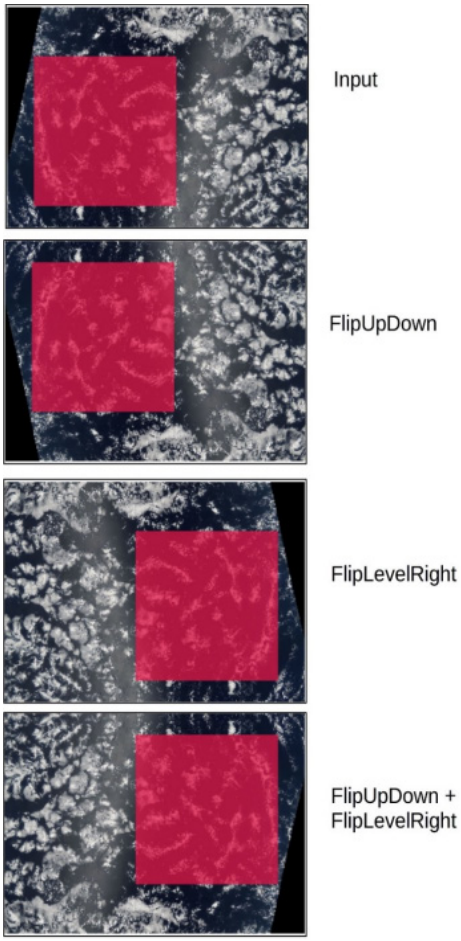


Рис. 4. Приклад аугментації відображення відносно вертикальної та горизонтальної осей

Інший тип аугментацій можна розділити на ті, що спотворюють вхідне зображення і маску, і ті, що спотворюють лише вхідне зображення. До першого типу належить поворот зображення на довільний кут у межах (-90; +90) та вирізання частини зображення (RandomCrop) (рис. 5).

Серед аугментацій, які спотворюють лише вхідне зображення, були JpegCompression з різною яскравістю, зміна контрасту та гами вхідного зображення (RandomContrast, RandomBrighness), випадкова перестановка кольорів, використання розмиття (GaussianBlur).

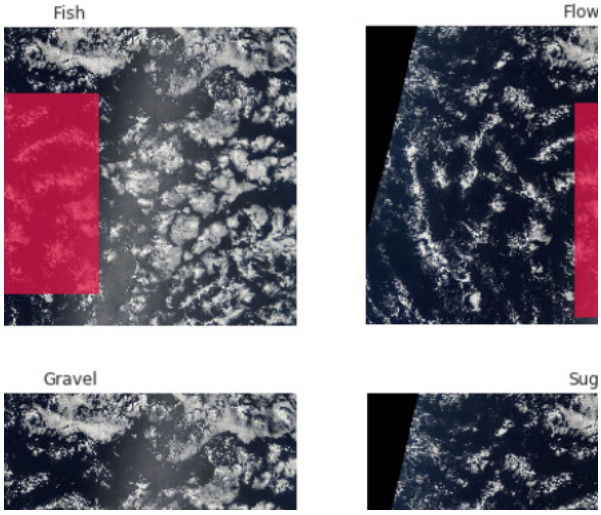


Рис. 5. Приклад аугментації за допомогою повороту та вирізання

До цього типу також можна віднести еластичну трансформацію (ElasticTransform), оптичне спотворення (OpticalDistortion), осьове спотворення (GridDistortion) (рис. 6).

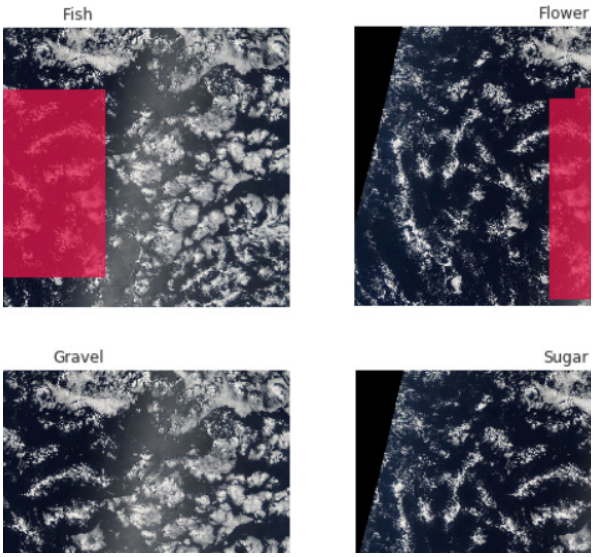


Рис. 6. Приклад аугментації зміною кольорів, яскравості та контрастності

Кожна з аугментацій застосовувалася незалежно від інших з певною ймовірністю (рис. 7).

Для підвищення точності кінцевого результату було використано аугментацію під час тесту (test time augmentation). На вхід нейромережі подається не тільки вихідне зображення, але й зображення після поворотів відносно вертикального та горизонтального віддзеркалень. До масок, отриманих на виході нейромережі, багаторазово застосовуються ті ж самі аугментації. В результаті отримуємо 4 зображення. Після підсумовування і знаходження середнього значення залишається тільки одне (рис. 8).

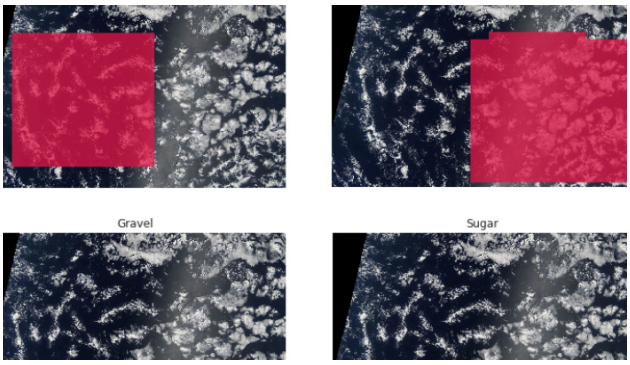


Рис. 7. Схема аугментації

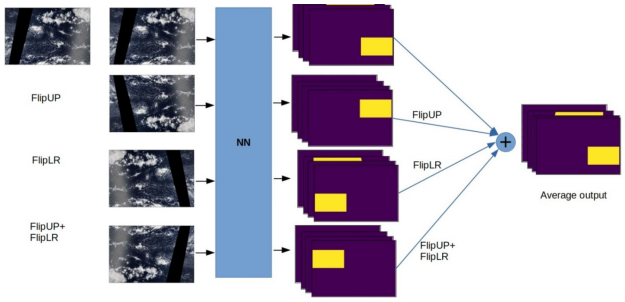


Рис. 8. Прогнозування з використанням аугментації під час тесту

Цей метод дозволяє підвищити точність нейронної мережі на локальній перехресній перевірці з 0,5690 до 0,5710 (на навчальній вибірці) і з 0,64928 до 0,6504 на тестовій вибірці (оцінка проводилася за допомогою платформи Kaggle).

Кінцевий результат базувався на мережах архітектури U-Net. Модель було реалізовано за допомогою бібліотеки Keras. Моделі були модифіковані під конкретну задачу. Всі моделі були навчені з використанням крос-валідації (на 5 згинах). В якості опорних мереж були обрані мережі різних архітектур, такі як ResNet-34, ResNet-50, ResNet-101, ResNext-50, DenseNet-56, SeRersNet-34, SeResNet-50. Функція втрат була обрана експериментально, і було визначено, що

бінарна cross-entropy разом з focal-loss та dice-loss у пропорціях 0,25, 0,25 та 0,5 показують найкращі результати. Бінарна функція втрат cross-entropy показує, наскільки точно нейромережа визначила клас конкретного пікселя (в нашому випадку або клас фону, або один з необхідних класів), focal-loss дозволяє акцентувати увагу нейромережі до складних прикладів, функція dice-loss дозволяє оперувати не конкретними пікселями, а цілими областями.

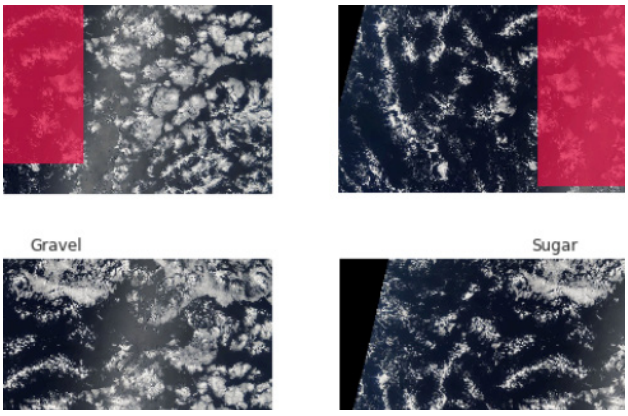


Рис. 9. Залежність функції втрат для однієї з моделей

Під час навчання точність перевірялася на валідаційній частині даних, якщо коефіцієнт Дайса не збільшувався протягом 5 періодів, коефіцієнт навчання зменшувався в 2 рази, а якщо не збільшувався протягом 10 періодів, навчання зупинялося. На рисунку 9 показано залежність функції втрат однієї з моделей, на рисунку 10 – коефіцієнт Дайса, а на рисунку 11 – коефіцієнт навчання.

Оскільки нейромережа дає ймовірність, то для того, щоб звести цю ймовірність до 0 або 1, було використано пошук оптимального порогу. Було визначено, що з ймовірністю > 0,5 піксель вважатиметься екземпляром певного класу, з меншою – фоном. Проведені дослідження показали підвищення точності сегментації з 0,638 до 0,647 після модифікації архітектури та покращення результатів при використанні аугментації під час тестування.

Висновки. Порівняно різні підходи до виконання семантичної сегментації зображень, досліджено специфіку супутникових зображень, порівняно різні архітектури та методи навчання нейронних мереж. Розроблено ефективну систему

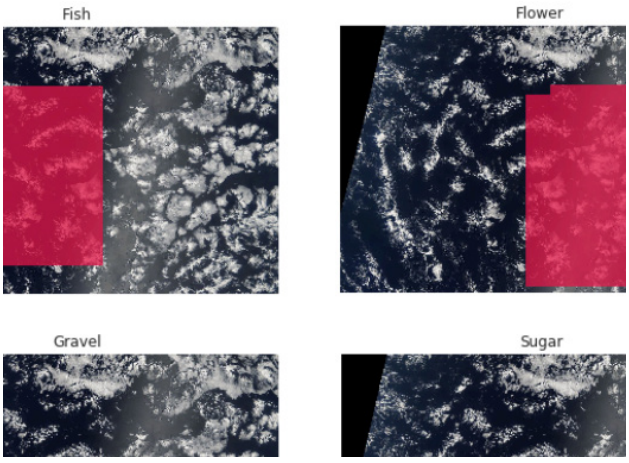


Рис. 10. Залежність коефіцієнта Дайса для однієї з моделей

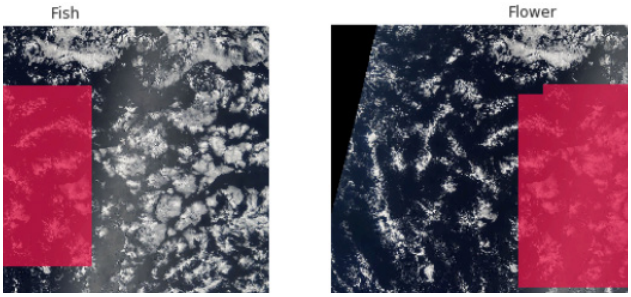


Рис. 11. Залежність коефіцієнт навчання для однієї з моделей

сегментації супутникових зображень на основі модифікованої архітектури U-Net, що дозволила підвищити точність сегментації на 1,4 % порівняно з базовою архітектурою. Запропонована модифікація включає оптимізовану структуру енкодера на базі SE-ResNet50 та удосконалений механізм пропускних з'єднань, що забезпечує краще збереження просторової інформації при обробці зображень. Результати розробки демонструють високу ефективність використання сучасних методів сегментації зображень для задач аналізу супутникових даних. Використання автоматизованих підходів значно спрощує аналіз великих обсягів інформації, забезпечуючи точність і оперативність. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на покращення алгоритмів обробки, зокрема врахування часових рядів і мультиспектральних даних.

Список літератури:

1. Pandey, B.N. and Rana, A., 2018, December. A literature survey of optimization techniques for satellite image segmentation. In 2018 International conference on advanced computation and telecommunication (ICACAT) (pp. 1-5). IEEE.

2. Bins, L.S.A., Fonseca, L.G., Erthal, G.J. and Ii, F.M., 1996. Satellite imagery segmentation: a region growing approach. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8(1996), pp.677-680.

3. Khryashchev, V., Ivanovsky, L., Pavlov, V., Ostrovskaya, A. and Rubtsov, A., 2018, November. Comparison of different convolutional neural network architectures for satellite image segmentation. In 2018 23rd conference of open innovations association (FRUCT) (pp. 172-179). IEEE.

4. Awad, M., 2010. An Unsupervised Artificial Neural Network Method for Satellite Image Segmentation. Int. Arab J. Inf. Technol., 7(2), pp.199-205.

5. Adegun, A.A., Akande, N., Ogundokun, R. and Asani, E., 2018. Image segmentation and classification of large scale satellite imagery for land use: a review of the state of the arts. Int. J. Civ. Eng. Technol, 9(11), pp.1534-1541.

6. Bandikolla, L. and Md Khairuzzaman, A.K., 2024, January. A Review on Satellite Image Segmentation Using Metaheuristic Optimization Techniques. In International Conference on Advances in Distributed Computing and Machine Learning (pp. 41-52). Singapore: Springer Nature Singapore.

7. Vignesh, U. and Ratnakumar, R., 2024. An Empirical Review on Clustering Algorithms for Image Segmentation of Satellite Images. AI and Blockchain Optimization Techniques in Aerospace Engineering, pp.33-52.

8. Lokula, B., Tirumuri, R. and LV, N.P., 2024. Satellite image segmentation using Unet++ andMobileNetV2 deep learning model.

9. Tarry, J., Dong, X., Li, X., Qian, L., Chance, L. and Morrone, P., 2024, February. Unsupervised Ensemble Semantic Segmentation for Foreground-Background Separation on Satellite Image. In 2024 IEEE 18th International Conference on Semantic Computing (ICSC) (pp. 212-217). IEEE.

10. Borkar, S., Chidrawar, K., Naik, S., Turuk, M.P. and Vaijapurkar, V.B., 2023, December. Latest Trends on Satellite Image Segmentation. In International Conference on Communication and Intelligent Systems (pp. 141-155). Singapore: Springer Nature Singapore.

11. N. Pandey, A. K. Shrivastava, A. Rana, A Literature Survey of Optimization Techniques for Satellite Image Segmentation, in International Conference on Advanced Computation and Telecommunication, ICACAT 2018 (2018).

12. Bins, L. S. A., Fonseca, L. G., Erthal, G. J., & Ii, F. M., 1996. Satellite imagery segmentation: a region growing approach. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8(1996), 677-680.

13. Khryashchev, V., Pavlov, V., Priorov, A., & Kazina, E., 2018. Convolutional neural network for satellite imagery. In Conference of Open Innovations Association, FRUCT (No. 22, pp. 344-347). FRUCT Oy.

14. Awad, M., 2010. Segmentation of satellite images using Self-Organizing Maps. In Self-organizing maps. IntechOpen.

15. Bandikolla, L., & Md Khairuzzaman, A. K., 2024. A Review on Satellite Image Segmentation Using Metaheuristic Optimization Techniques. In International Conference on Advances in Distributed Computing and Machine Learning (pp. 41-52). Singapore: Springer Nature Singapore.

16. Vignesh, U., & Ratnakumar, R., 2024. An Empirical Review on Clustering Algorithms for Image Segmentation of Satellite Images. AI and Blockchain Optimization Techniques in Aerospace Engineering, 33-52.

17. Babitha Lokula, Ramakrishna Tirumuri, Narasimha Prasad L V et al. Satellite image segmentation using Unet++ andMobileNetV2 deep learning model, 2024, PREPRINT (Version 1) https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4144393/v1

Novak D.S., Moshenskyi A.O., Guida O.H., Ometsynska N.V., Dromenko V.B. SATELLITE IMAGE SEGMENTATION SOFTWARE DEVELOPMENT

Image segmentation is a powerful method for identifying and separating different objects or areas in an image and has a wide range of applications. As image segmentation evolves rapidly, future directions will focus on improving segmentation accuracy, integrating deep learning with traditional methods, and exploring new applications in various industries. Using automatic segmentation for satellite image analysis is a promising direction that can reduce manual intervention and improve accuracy. Integrating deep learning with traditional methods will increase the overall performance of the software being developed.

Different approaches to performing semantic image segmentation are compared, the specifics of satellite imagery are studied, and different architectures and methods for training neural networks are compared.

The work is dedicated to developing software for analyzing satellite images, which play a key role in various fields, from environmental monitoring to urban planning. Image segmentation techniques have efficiently extracted the necessary information from these vast datasets. Software with a graphical interface was developed, and practical studies of the implemented system were carried out, which can be used in the future for land cover classification, natural disaster monitoring, and urban infrastructure development planning.

Dissemination of the developed software to the scientific community and relevant industries is a key aspect of this work. The thesis outlines potential avenues for future improvements in satellite image segmentation. It is planned to integrate the improved algorithms into a user-friendly software package and to expand the functionality for researchers and practitioners, as well as in the efficient processing of meaningful information from satellite images, which will ultimately contribute to the advancement of remote sensing and geospatial analysis.

Key words: *image segmentation, satellite images, software, data processing, semantic segmentation.*

UDC 004.415.2
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/20

Oleshchenko L.M.
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

SOFTWARE IMPLEMENTATION OF THE HUFF GRAVITY MODEL FOR OPTIMAL SPATIAL PLACEMENT OF URBAN SERVICE FACILITIES

The article analyzes software methods for modeling the optimal placement of service facilities using optimization algorithms, geostatistics, and machine learning. The software ArcGIS, QGIS, MapInfo Professional, Tango Geospatial Platform which offer tools for spatial analysis and allow the integration of various datasets, such as demographic information and infrastructure layouts, has been analyzed. The main limitations of using ArcGIS and QGIS relate to high cost, performance, learning curve, and integration capabilities. ArcGIS is commercial software with high licensing costs that may not be affordable for small organizations. Processing large amounts of data can be slow in ArcGIS. Optimization algorithms, such as the k-means clustering and facility location problem (FLP) models, help in determining the most effective placement. Machine learning techniques, particularly in spatial data science, can also predict optimal locations based on patterns in statistical historical data. Efficient placement of service facilities, such as healthcare centers, retail stores, or public services, significantly impacts accessibility, customer satisfaction, and operational efficiency.

Software for spatial modeling of optimal placement of service facilities using Google Maps API data is proposed, which can be used for the needs of modern urban planning and business logistics. For the software implementation of the gravity Huff model, libraries and modules of the Python programming language were used: Requests, Numpy, Geopy.distance, Geodesic, Folium, MarkerCluster.

By leveraging geospatial data from Google Maps API, proposed method enables accurate analysis of location patterns, population density, and travel routes, leading to data-driven decisions. This approach not only enhances service coverage and reduces costs but also supports sustainable urban development by optimizing resource distribution and minimizing travel times.

Key words: *software, gravity Huff model, spatial modeling of optimal placement, Python programming language, regression analysis, Google Maps API.*

Introduction. Problem statement. The choice of location for a retail zone is one of the key decisions for retail companies. The store's location affects the number of potential customers and sales volume, as well as the costs associated with renting or purchasing land, which can vary significantly depending on the site. The location shapes the store's image and the image of the entire retail network. While the cost of rent and construction rights are usually known in advance, sales turnover can only be forecasted, making this step the most challenging. The demand for goods and services in a retail zone is determined by geography. Entrepreneurs seek to place their stores not only where there are many customers but where there are customers that match their target audience. The importance of the location lies in the fact that it is a unique factor that provides a competitive advantage and requires significant capital investment. The store's location influences customer attraction, as well as the supply and distribution of goods. To assess a location's potential, it is necessary to determine the maximum distance customers are willing to travel, the population within that radius, and the number of competitors in the region. Entrepreneurs should follow certain steps: market analysis, evaluation of demographic indicators, market potential assessment, and selecting alternative locations. Software can automate these processes, helping to choose the optimal store location, while also providing users with information about the nearest stores.

The main goal of the article is software development for spatial modeling of optimal placement of service facilities in the city using the Huff gravity model and analysis of Google Maps API data.

Related research. The research article [1] explores the concept of food deserts in urban areas, focusing on the intersection of public transportation and food accessibility. The authors employ geo-big data analysis to examine the relationship between transit routes, social inequality, and food access. The research aims to provide urban planners with insights on how to address food deserts and promote healthy eating habits in urban populations. The research

[2] explored the use of a geographically weighted regression (GWR) model instead of the traditional global ordinary least squares (OLS) model in the Huff model for retail distribution. By accounting for spatial nonstationarity in parameters, the local model provided more accurate results. The research demonstrated that the local model offered a better fit than the global OLS model, especially in capturing store performance and customer preferences.

The study [3] validated the Huff gravity model using a large-scale transactional dataset, marking the first real-data validation of the model. The researchers found that the Huff model accurately represents customer shopping behavior across various categories, such as grocery stores, clothing stores, gas stations, and restaurants. The model can be easily applied to different regions and merchant categories. Regression analysis revealed that factors like gender and marital status diversity improved the model's validation, offering deeper understanding into customer behavior. The research [4] presents a new method to uncover urban functions by aggregating human activities using mobile phone positioning and social media data. It identifies homes, workplaces, and other activities (e.g., shopping, schooling, entertainment) through a hidden Markov model and analyzes the diurnal dynamics of urban functions. In a case study of Shenzhen, China, the results show that urban areas may serve multiple functions throughout the day, despite being labeled with a single land-use type. The approach offers valuable findings into citywide human activity patterns, aiding both short-term urban decision-making and long-term policy planning.

In the article [5] authors analyze trade area delimitation using social media data. In a case study of Beijing, the city was divided into grid cells, and activity centers for social media users were extracted. Ten sample sets were created by selecting users based on retail locations they visited, and distance and visitation frequency were calculated for each grid cell. These values were input into a Huff model to delimit trade areas. Results indicate that aggregating user activity centers improves delimitation accuracy, and differences in trade area distribution and intensity were observed. The research article [6] examines human spatial convergence and divergence using large-scale mobile phone data. Researchers developed a method to identify spatiotemporal patterns of human movement and extracted eight distinct patterns. These patterns were analyzed in relation to urban functional regions. The research results offer understanding into how human mobility patterns evolve over time and their connection to the urban environment, which can support urban policy, planning, and traffic management.

The study [7] examines the relationship between mixed-use development and neighborhood vibrancy using new data sources like mobile phone data and Points of Interest (POI). Traditional measures, such as Shannon entropy, are found inadequate to capture the multidimensional aspects of mixed use. Using Hill numbers, the study developed new indicators for mixed use and analyzed how they relate to neighborhood vibrancy, represented by mobile phone user activity over 24 hours. The results showed that POI richness significantly improves vibrancy, while POI density and entropy explain only a small portion. The study highlights the limitations of traditional metrics and the importance of mixing complementary POIs for better neighborhood design and planning.

The research article [8] introduces a time-aware dynamic Huff model (T-Huff) for analyzing location-based market share, calibrated using large-scale mobile phone location data from the 10 most populated U.S. cities. By comparing hourly visit patterns for supermarkets and department stores, the T-Huff model proved more accurate than the original Huff model in predicting market share over time. The research also revealed that people in metropolitan areas with developed transit systems are less sensitive to long-distance visits. Socioeconomic and demographic factors, like median household income, were identified as influencing visit decisions. In the article [9] authors analyze how web analytics can be used to determine optimal locations for new recreational facilities in cities. By analyzing user search data, reviews, and the popularity of existing institutions, a probabilistic model was developed to identify the best places for new facilities. The model considers factors like territorial characteristics, competitor influence, and user needs. Authors propose a new software solution that leverages online data to simulate optimal placement for future recreational establishments.

Existing software solutions analysis

MapInfo Professional (Fig. 1) is a software developed by Pitney Bowes Software (formerly MapInfo Corporation) that is used for mapping and location analysis. It enables users to visualize, analyze, edit, interpret, and output data in a user-friendly format to discover relationships, patterns, and trends. MapInfo allows users to explore spatial data, symbolize features, and create maps.

MapInfo Pro is a 64-bit Geographic Information System (GIS) application used by GIS engineers and business analysts [10]. Areas of MapInfo Professional application are next.

– Risk analysis related to environmental or natural hazards such as floods, tornadoes, hurricanes, or crime.

– Assessing environmental impacts like pollution, erosion, invasive species, and climate change, including human-caused environmental shifts.

– Collaborating with local planning and engineering groups on construction projects.

– Utilizing geographic intelligence to identify marketing regions.

– Determining the optimal location for opening or closing retail facilities (e.g., stores, factories, depots) based on customer and employee locations, demographics, purchase patterns, and transportation links.

– Systematic analysis of spatial data to identify patterns and trends in crime and disorder.

– Visualization of spatial data such as drill holes, soil samples, geophysical surveys, lease boundaries, and cadastral data.

Tango Geospatial Platform offers predictive analytics for customers and locations, providing tailored GIS and location development in a single package (Fig. 2). Key features include location data management, high-quality location data, geocoding. Stores information on locations, including shops, sites, rental data, and competitors, along with geographic information such as trade zones, regions, markets, and

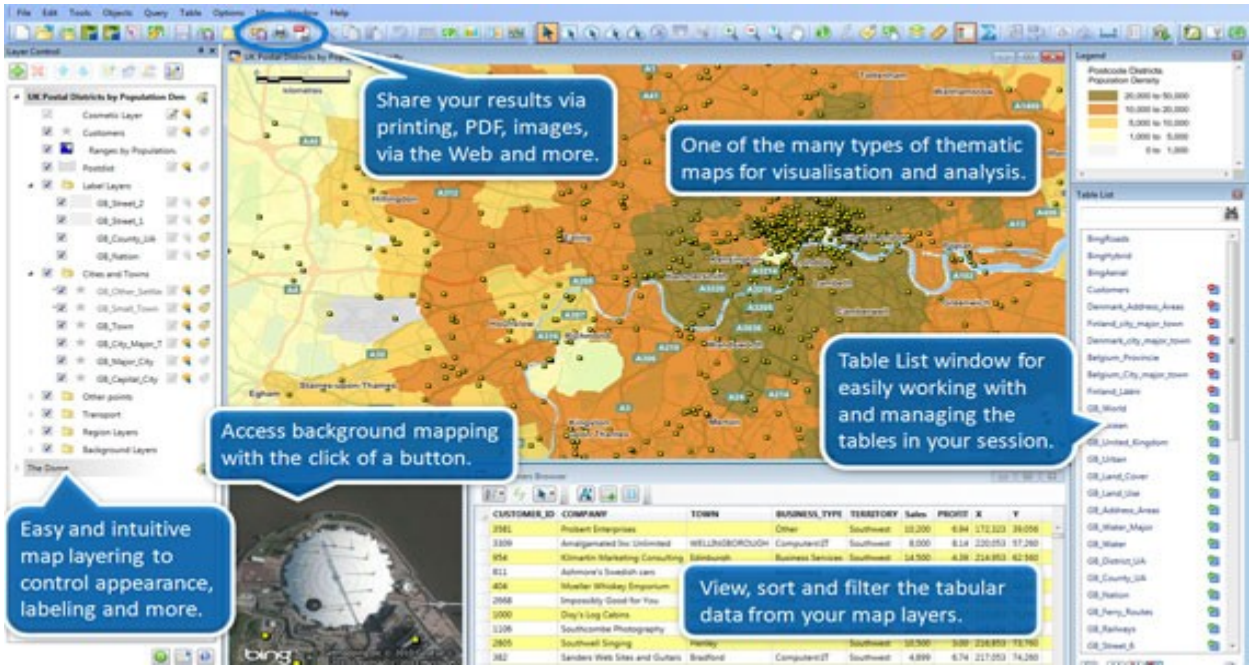


Fig. 1. Example of Pitney Bowes MapInfo in use

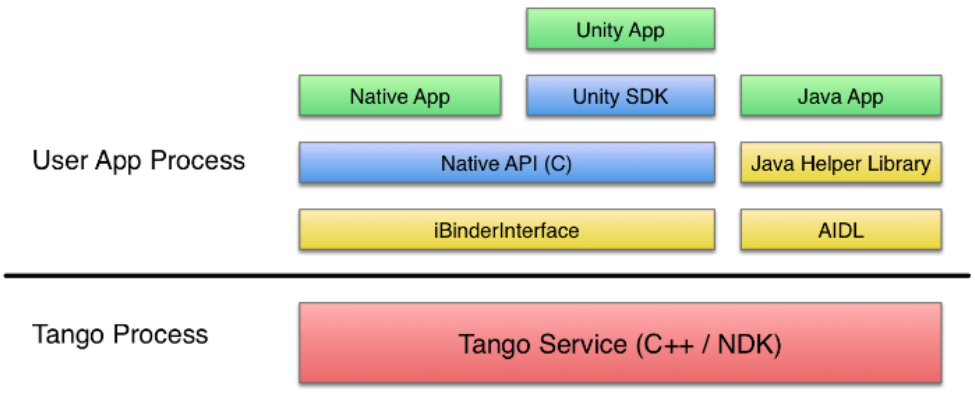


Fig. 2. Overview of Tango's API

territories. Built-in processes and tools help identify new data and detect anomalies in existing data, ensuring accuracy throughout the system. Converts address data into latitude and longitude [11].

Oracle Locator is a feature in all editions of the Oracle Database (Standard Edition, Standard Edition One, and Enterprise Edition), enabling the handling, querying, and analysis of positional data through standard SQL. It serves as a foundation for business applications that use location data, allowing developers to integrate spatial data into their apps easily. Oracle Locator ensures high levels of security, performance, scalability, and manageability provided by Oracle D. Each Oracle database includes built-in location functionality, enabling any business application to integrate location information and gain competitive advantages [12].

Oracle Spatial, an additional feature in Oracle Database 10g Enterprise Edition, offers utilities for processing spatial data used in GIS applications and location-based services. It supports all types of geospatial data, including vector, raster, topological, and network models, meeting GIS needs such as land management, utilities, and security [13].

Maptitude Mapping Software is a powerful Geographic Information System (GIS) designed for mapping and spatial analysis. It enables users to visualize, analyze, and manipulate geographic data for business, urban planning, and market analysis, among other fields (Fig. 3).

Maptitude offers extensive tools for demographic mapping, location analysis, and creating reports from spatial data, making it suitable for professionals without extensive GIS experience. Its drawbacks include a steep learning curve for beginners, limited compatibility with other GIS platforms, and a user interface that some may find outdated compared to newer GIS software. It also lacks certain advanced features found in more specialized GIS tools like ArcGIS.

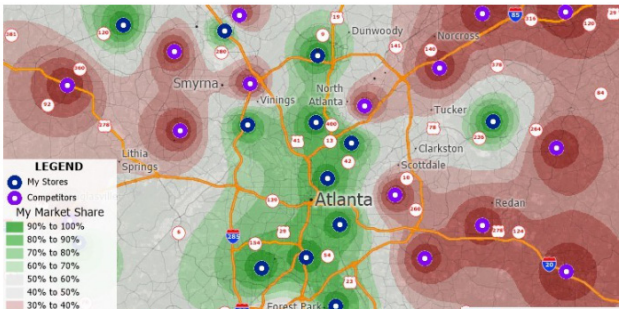


Fig. 3. Maptitude Mapping Software

ArcGIS Spatial Analyst provides a wide range of powerful spatial modeling and analysis functions (Fig. 4). It allows users to create, query, and analyze raster data; perform integrated raster/vector analysis; extract new information from existing data; run multi-layer data queries, and fully integrate raster data with traditional vector data sources. The latest version is fully integrated with Python but lacks a mobile version. The application has some drawbacks: from a software perspective it requires high-end hardware and manual data entry, which may be unfamiliar to the user; from a user perspective: the interface can be complex, requiring some expertise to use effectively [14].

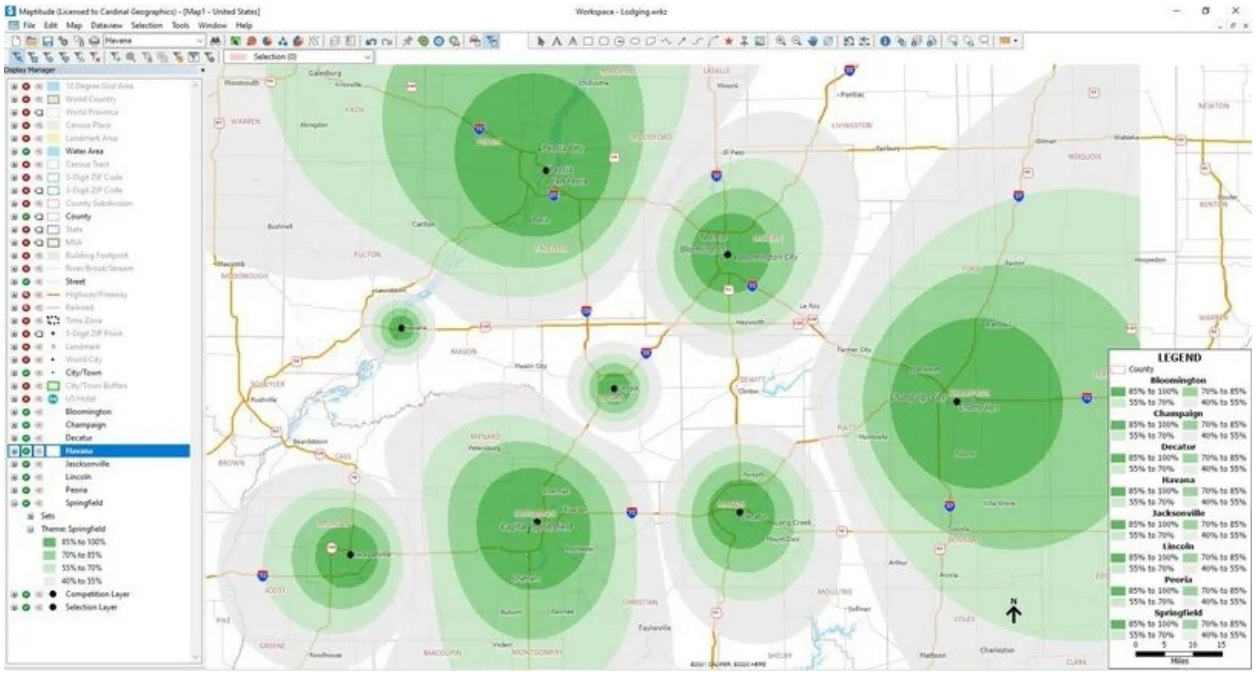


Fig. 4. Result of determining the best retail location

Key factors for service facility building

After reviewing the existing software solutions drawbacks, the following key factors must be taken into account when constructing service facility in the Kyiv city:

– Facility size.

– Number of nearby competitors.

– Environmental factors (e.g., nearby polluting factories).

– Accessibility for visitors from different parts of Kyiv.

Several tools are available that analyze all these factors, often incorporating terrain analysis and 3D modeling for a more detailed view. Existing software tools go beyond determining optimal retail locations, offering features like route planning and terrain analysis. They have limitations: most do not support the Ukrainian language and can be costly. ArcGIS requires powerful hardware and manual data input. The tools from Oracle, ArcGIS, and Tango Geospatial Platform often have complex interfaces, requiring users to study documentation thoroughly before use. Pitney Bowes MapInfo offers a more user-friendly interface, but it only supports 64-bit operating systems. After analyzing the market of existing software products, several limitations were identified. Based on these findings, the main requirements for the new application were defined: an intuitive interface, up-to-date data, and the ability for users to input only the desired area.

The Huff gravity model

The Huff gravity model states that the probability that a consumer will choose a particular location to purchase or visit depends on two main factors:

1. attractiveness of the location – characteristic that may depend on the size, services available, quality, or other attributes of the location.

2. distance to the location – the closer the location is to a potential customer, the more likely the customer is to choose it.

The basic equation for calculating the probability that a consumer from a given area (or point) will choose a particular location is as follows:

$$P_{ij} = \frac{U_{ij}}{\sum_{k=1}^{n} U_{ik}} = \frac{S_j^{\alpha} * D_{ij}^{\beta}}{\sum_{k=1}^{n} S_k^{\alpha} * D_{ik}^{\beta}} \qquad (1)$$

where P_{ij} is the probability of a consumer from city i visiting point j; n is the set of competing points (or cities) in the region, U_{ij} is the utility of point j for an individual in i, S_j is the area of service facility j, D_{ij} is the distance between the consumer in i and point j, D_{ij} and β are the sensitivity parameters.

Stages of using the Huff model for spatial location modeling are next.

Stage 1. To apply the model, data is required on candidate locations for a new facility (building, service facility); distances between potential locations and customer residence areas and attractiveness of each existing and new facility (area, number of services, other factors).

Stage 2. For each location, the probabilities are calculated that customers from different areas will visit this facility. This allows to see which facility has the greatest potential number of visitors, based on distances and characteristics.

Stage 3. After calculating the probabilities, we can see which location is optimal for locating a new building or service facility, taking into account spatial competition with other locations.

Stage 4. Make informed decisions about where to locate new facilities, considering which location has the greatest potential to attract customers.

Research data

According to statistical data, around 60% of users consider reviews when choosing a leisure venue. The more reviews an service facility has, the better its popularity can be gauged. If a service facility has predominantly negative reviews, it is likely to attract fewer consumers. To obtain this information, users rely on mapping services like Google Maps, which allows reviews and ratings for visited places. Another crucial factor is website traffic. The assumption here is straightforward: the higher the traffic, the more popular the service facility. Consumers visit websites to gather various information, with studies showing that 29% of visitors check prices, 15% look at the service offerings, and 13% seek promotions. Website traffic is measured by two metrics: the number of visitors and the number of page views. Page views represent the total number of fully loaded pages over a specific period, while visitors refer to the number of unique users who have visited the website and loaded at least one page. The more pages a single user views, the better for the site. For example, if a user visits the site and views five pages, it adds one to the visitor count and five to the page view count.

The first criterion selected is the visitor rating of a given location, which can be obtained through a mapping service. Considering that consumers use the website to check pricing, service offerings, and promotions, the number of page views and site visitors became the next criteria. The size of the venue should be considered, as larger spaces are more likely to attract higher visitor numbers.

The research utilizes data from the Google Places API, including geographic coordinates, names, and types of existing restaurants in the target area, sup-

plemented by tools such as geopy for distance calculations and *folium* Python library for interactive map visualization.

Software implementation of the Huff gravity model for optimal spatial placement of new restaurants

Consider the new software method for identifying optimal locations for new restaurants using data-driven analysis and visualization techniques. The process consists of the following steps.

Google Places API Query

The initial step involves sending requests to the Google Places API to retrieve data about existing restaurants in the target area. The API provides comprehensive information, including the geographical coordinates, names, and types of restaurants, forming the foundational dataset for analysis. The implementation utilizes the following libraries: *requests* for sending HTTP requests to the Google Places API to fetch restaurant data, *numpy* for array manipulation and mathematical operations, *geopy.distance* for calculating distances between geographic points, *folium* library for creating and visualizing interactive maps, and *MarkerCluster* for clustering markers on maps in densely populated areas.

The function *get_restaurants_data* retrieves a list of restaurants within a specified radius from a given geographic point (latitude, longitude):

```
def get_restaurants_data(lat, lng,
radius=500):
    url = f"https://maps.googleapis.com/
maps/api/place/nearbysearch/json?key={API_
KEY}&location={lat},{lng}&radius={radius}&-
type=restaurant&language=uk_UA"
    response = requests.get(url)
    if response.status_code == 200:
        return response.json().get('re-
sults', [])
    else:
        print("Error connecting to API")
        return []
```

It utilizes the Google Places API to fetch nearby restaurant data, including coordinates, names, ratings, and review counts. The function sends an HTTP request to the API endpoint and checks the response status code. If the request is successful (status code 200), it returns the restaurant data as a list. Otherwise, it prints an error message indicating a connection issue. This function streamlines the process of gathering localized restaurant information for further analysis and visualization.

Data Analysis Using Huff Model

The retrieved data is analyzed using the Huff model, which predicts the likelihood of customer attraction to a given location. This analysis incorporates factors such as distance, competition density, and population demographics to identify the most suitable site for a new restaurant. The results of the analysis are visualized on an interactive map: existing restaurants are displayed as green circles with a service radius of 1 km. The proposed location for the new restaurant is marked as a red circle with the same service radius of 1 km. This visualization allows stakeholders to intuitively assess the spatial relationships and service areas.

Consider the software implementation of the Huff model:

```
def huff_model(restaurants, user_location,
beta=2):
    total_attractiveness = 0
    probabilities = []
    for restaurant in restaurants:
        location = restaurant['geometry']
['location']
        rating = restaurant.get('rating', 0)
        reviews = restaurant.get('user_rat-
ings_total', 1)
        attractiveness = rating * reviews
        distance = calculate_distance(user_
location, (location['lat'], loca-
tion['lng']))
        attractiveness_distance_ratio =
attractiveness / (distance ** beta)
        total_attractiveness += attractive-
ness_distance_ratio
        probabilities.append({
            "restaurant": restaurant,
            "attractiveness_distance_ratio":
attractiveness_distance_ratio
        })
    for probability in probabilities:
        probability['probability'] = prob-
ability['attractiveness_distance_ratio'] /
total_attractiveness
    return probabilities
```

The *huff_model* function implements the probabilistic Huff model to assess the competitiveness of each restaurant based on its "attractiveness" and distance from a user-defined location. The attractiveness of a restaurant is calculated as the product of its rating and the number of reviews. This metric combines both qualitative (rating) and quantitative (review count) factors, providing a comprehensive measure of a restaurant's appeal to potential customers. The distance from the user's location to each restaurant is computed. This metric plays a critical role in determining the likelihood of a customer visiting a specific restaurant, as proximity often influences customer behavior. The probability of a customer visiting a given restaurant is derived as the ratio of the restaurant's attractiveness to the square of the distance.

A sensitivity parameter β in the formula (1) is introduced to control the model's responsiveness to distance, allowing for customization based on specific geographic or demographic contexts. This approach provides a robust framework for evaluating and comparing potential restaurant sites, integrating customer preferences, competition, and spatial factors into a unified probabilistic model.

We create a function to find the optimal location:

```
def find_optimal_location_for_new_restaurant(restaurants, user_locations):
    best_location = None
    best_probability = 0
    for user_location in user_locations:
        probabilities = huff_model(restaurants, user_location)
        total_competition = sum([p['probability'] for p in probabilities])

        if total_competition > best_probability:
            best_probability = total_competition
            best_location = user_location
    return best_location
```

The *find_optimal_location_for_new_restaurant* function calculates the overall probability of competitive viability for each proposed location, aiding in the identification of the most advantageous site for a new restaurant. For each candidate location, the function computes the total probability of customer visits to restaurants in the vicinity. This aggregate measure accounts for the cumulative attractiveness and accessibility of existing establishments in the area.

The location with the highest overall competitive probability is identified as the optimal choice. This selection maximizes the likelihood of attracting customers, balancing factors such as competition and proximity to potential clients. This method provides a data-driven approach to site selection, ensuring the proposed location is strategically positioned for maximum market competitiveness.

To implement this approach, users should obtain an API key from Google Places, as described in the setup documentation.

The *visualize_restaurants_on_map* function generates an interactive map using folium, displaying existing restaurants and their service areas alongside the optimal location for a new restaurant, if identified:

```
def visualize_restaurants_on_map(restaurants, new_location, user_locations):
    m = folium.Map(location=[50.4501, 30.5234], zoom_start=12)
    marker_cluster = MarkerCluster().add_to(m)
    for restaurant in restaurants:
        location = restaurant['geometry']['location']
        name = restaurant['name']
        rating = restaurant.get('rating', 0)
        folium.CircleMarker(
            location=[location['lat'], location['lng']],
            radius=10,
            color='green',
            fill=True,
            fill_color='green',
            fill_opacity=0.6,
            tooltip=f"{name} (Rating: {rating})"
        ).add_to(marker_cluster)
        folium.Circle(
            location=[location['lat'], location['lng']],
            radius=1000,
            color='green',
            fill=True,
            fill_opacity=0.1
        ).add_to(m)
    if new_location:
        folium.CircleMarker(
            location=new_location,
            radius=12,
            color='red',
            fill=True,
            fill_color='red',
            fill_opacity=0.8,
            tooltip="New Restaurant (Optimal Location)"
```

The map is centered on Kyiv city, with existing restaurants represented by green circular markers and a 1 km service radius. The optimal location for the new restaurant is highlighted with a red marker and an accompanying 1 km service radius. By clustering markers using *MarkerCluster*, the function ensures a clean and interactive visualization, enabling users to explore restaurant distribution and service coverage intuitively. For each candidate location, the function computes the total probability of customer visits to restaurants in the vicinity. This aggregate measure accounts for the cumulative attractiveness and accessibility of existing establishments in the area. The location with the highest overall competitive probability is identified as the optimal choice. This selection maximizes the likelihood of attracting customers, balancing factors such as competition and proximity to potential clients.

Research results

The optimal service area for a restaurant depends on several factors: type of restaurant, population density, competition, accessibility. Fast-food outlets typically have smaller service radii (up to 1 km), whereas fine-dining establishments may attract customers from a broader area (up to 3-5 km). In densely populated urban areas, the service radius may be limited to 0.5–1 km, while less populated regions may require a broader reach. A higher concentration of competitors in the vicinity may necessitate a smaller service radius due to increased competition.

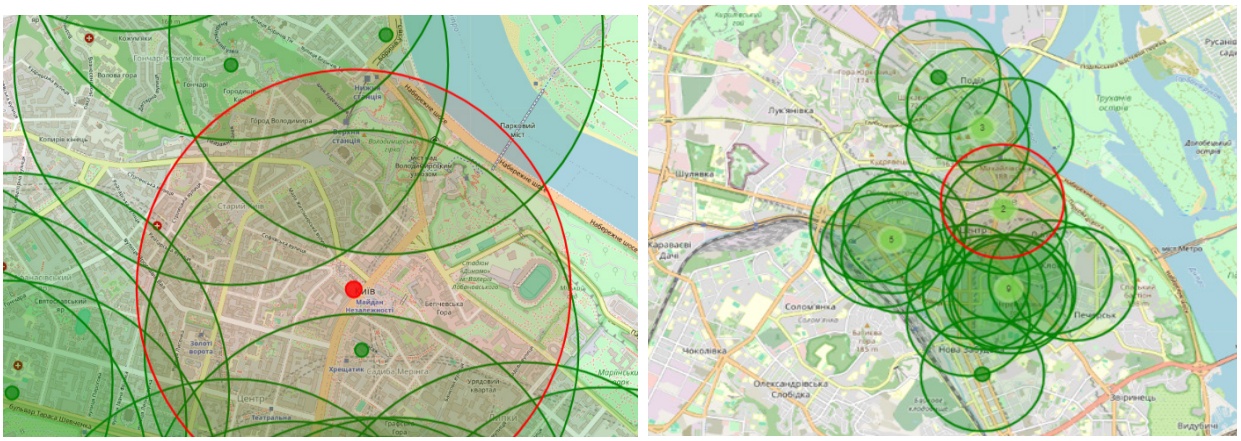


Fig. 5. Density map of existing restaurants in Kyiv with 1 km service radius (the red circle marks the optimal location for 1 new restaurant)

Factors such as transportation availability and parking convenience influence how far customers are willing to travel. For urban areas service radii generally range from 0.5 to 1 km. For suburban areas service radii can extend to 2–3 km, depending on population density. For rural areas due to lower population densities, the service radius may expand to 5–10 km.

The visualization represents a density map of existing restaurants in the city of Kyiv, marked by green circles with a 1 km service radius. The red circle highlights the optimal location for a new restaurant, as determined by the analysis (Fig. 5).

The map suggests that the selected area has high potential for market entry, likely due to favorable proximity to underserved zones or reduced competition. The clustering of markers demonstrates areas of restaurant saturation, while the red marker emphasizes a strategically advantageous location based on the Huff model's probabilistic competitiveness analysis.

One of the key advantages of this solution is its economic accessibility, as it relies on open data and uses free or publicly available libraries, such as *folium* for visualization and the Google Places API for data retrieval. This significantly reduces costs compared to commercial geo-analytical platforms, which often require expensive licenses and specialized equipment. The proposed approach is flexible and scalable: the algorithms can easily be adapted for analyzing other types of businesses or geographical areas, making it versatile for various scenarios. Interactive visualization of results on the map allows users to quickly assess spatial distribution and understand the competitive environment without requiring specialized expertise in geoinformation systems. The integration of the probabilistic Huff model enables consideration of important factors such as attractiveness and accessibility, providing a more accurate and justified selection of the optimal location than standard methods based solely on geographical positioning or population density.

Conclusions and future work. The probabilistic gravity-based Huff model is a powerful tool for modeling the spatial placement of new facilities, allowing for the maximum utilization of spatial data to predict customer or consumer distribution. The developed software is designed to search for restaurants and determine the optimal location for opening a new restaurant in the city of Kyiv using the probabilistic gravity-based Huff model. The code enables the visualization of results on an interactive map using the *folium* library. The Huff model estimates the probability that a customer will choose a particular restaurant, taking into account both its attractiveness and its distance. This model allows for identifying the optimal location for a new restaurant, where competition with others is minimized.

Further development of this software will allow for the inclusion of additional factors such as demographic data, pedestrian and vehicular traffic flows, as well as seasonal and socio-economic characteristics of the region, which will enhance the accuracy of predictions and facilitate more effective decision-making for business planning and the placement of commercial facilities.

Bibliography:

1. Su S., Li Z., Xu M., Cai Z., Weng M. A geo-big data approach to intra-urban food deserts: transit-varying accessibility, social inequalities, and implications for urban planning. *Habitat International*. 2017. № 64. P. 22–40. DOI: 10.1016/j.habitatint.2017.04.007.

2. Súarez-Vega R., Gutíerrez-Acuña J. L., Rodríguez-Díaz M. Locating a supermarket using a locally calibrated Huff model. *International Journal of Geographical Information Science*. 2015. № 29 (2). P. 217–233. DOI: 10.1080/13658816.2014.958154.

3. Suhara Y., Bahrami M., Bozkaya B., Pentland A. Validating gravity-based market share models using largescale transactional data. *Big Data*. 2021. Vol. 9, № 3. P. 188-202. DOI:10.1089/big.2020.0161.

4. Tu W., Cao J., Yue Y., Shaw S.-L., Zhou M., Wang Z., & Li Q. Coupling mobile phone and social media data: A new approach to understanding urban functions and diurnal patterns. *International Journal of Geographical Information Science*. 2017. № 31 (12). P. 2331–2358. DOI: 10.1080/13658816.2017.1356464.

5. Wang Y., Jiang W., Liu S., Ye X., Wang T. Evaluating trade areas using social media data with a calibrated Huff model. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2016. № 5 (7). P. 1–15. DOI: 10.3390/ijgi5070112.

6. Yang X., Fang Z., Xu Y., Shaw S.-L., Zhao Z., Yin L., Lin Y. Understanding spatiotemporal patterns of human convergence and divergence using mobile phone location data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2016. № 5 (10). P.177–195. DOI: 10.3390/ijgi5100177.

7. Yue Y., Zhuang Y., Yeh A. G., Xie J.-Y., Ma C.-L., Li Q.-Q. Measurements of POI-based mixed use and their relationships with neighbourhood vibrancy. *International Journal of Geographical Information Science*. 2017. № 31(4). P. 658–675. DOI: 10.1080/13658816.2016.1220561.

8. Liang Y., Gao S., Cai Y., Foutz N.Z., Wu L. Calibrating the dynamic Huff model for business analysis using location big data. *Transactions in GIS*. 2020. № 24. P. 681–703. DOI: https://doi.org/10.1111/ tgis.12624.

9. Oleshchenko L., Bilohub D., Yurchyshyn V. Internet Data Analysis for Evaluation of Optimal Location of New Facilities. *Advances in Intelligent Systems and Computing.* 2019. № 836. P. 279-291. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-97885-7_28.

10. MapInfo Pro. URL: https://www.precisely.com/product/precisely-mapinfo/mapinfo-pro (дата звернення 15.11.2024).

11. Tango Platform - Tango Analytics. URL: https://tangoanalytics.com/products/tango-platform/ (дата звернення 15.11.2024).

12. Oracle Locator. URL: https://docs.oracle.com/en/database/oracle/oracle-database/12.2/spatl/oracle-locator.html (дата звернення 15.11.2024).

13. Spatial Database – Oracle. URL: https://www.oracle.com/database/spatial/ (дата звернення 15.11.2024).

14. ArcGIS Spatial Analyst. URL: https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-spatial-analyst/ (дата звернення 15.11.2024).

Олещенко Л.М. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ГРАВІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ХАФФА ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОСТОРОВОГО РОЗМІЩЕННЯ ОБ'ЄКТІВ ОБСЛУГОВУВАННЯ МІСТА

У статті проаналізовано програмні методи моделювання оптимального розміщення об'єктів обслуговування, які використовують алгоритми оптимізації, геостатистику та машинне навчання. Проаналізовано програмне забезпечення ArcGIS, QGIS, MapInfo Professional, Tango Geospatial Platform, що пропонує інструменти для просторового аналізу та дозволяє інтегрувати різні набори даних, такі як демографічна інформація та макети інфраструктури. Основні обмеження використання ArcGIS і QGIS стосуються високої вартості програмного забезпечення, продуктивності, кривої навчання, і можливостей інтеграції. ArcGIS є комерційним програмним забезпеченням з високою вартістю ліцензій, що може бути недоступним для невеликих організацій. Обробка великих обсягів даних може бути повільною в ArcGIS. Алгоритми оптимізації, такі як кластеризація k-середніх і моделі розташування об'єктів FLP допомагають визначити оптимальне розміщення нових об'єктів. Методи машинного навчання, зокрема в науці про просторові дані, дозволяють передбачати оптимальне розташування на основі шаблонів у історичних статистичних даних. Ефективне розміщення об'єктів обслуговування, таких як центри охорони здоров'я, роздрібні магазини чи громадські служби, значно впливає на ефективність їх роботи, доступність та задоволеність клієнтів.

Запропоноване програмне забезпечення для просторового моделювання оптимального розміщення об'єктів обслуговування з використанням даних Google Maps API може використовуватись для потреб сучасного містобудування та бізнес-логістики. Для програмної реалізації гравітаційної моделі Хаффа було використано бібліотеки та модулі мови програмування Python: Requests, Numpy, Geopy.distance, Geodesic, Folium, MarkerCluster.

Використовуючи геопросторові дані з Google Maps API, запропонований програмний метод дозволяє аналізувати моделі розташування, щільність населення та маршрути подорожей, що дає змогу приймати рішення на основі наявних даних. Цей підхід може покращити охоплення послугами та зменшити витрати, також підтримувати сталий розвиток міст шляхом оптимізації розподілу ресурсів і мінімізації часу на дорогу.

Ключові слова: *програмне забезпечення, гравітаційна модель Хаффа, просторове моделювання оптимального розміщення, мова програмування Python, регресійний аналіз даних, Google Maps API.*

UDC 004.415.2
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/21

Oleshchenko L.M.
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Tarelkina K.O.
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

USER-DRIVEN VIDEO COLORIZATION SYSTEM DEVELOPMENT USING GENERATIVE ADVERSARIAL NEURAL NETWORK

The article presents a method and software for automated video colorization using deep learning algorithms. The challenge of automated colorization lies in predicting the color channel values for each frame based on input brightness values (L channel in the Lab color model) while ensuring spatio-temporal consistency. The goal of this research is to develop a software system that integrates user input for color palette adjustments and ensures color consistency across frames.

The proposed method implements a two-stage process: colorizing keyframes using a Generative Adversarial Network (GAN) with U-Net-based generator and colorizing intermediate frames using keyframes and previously colorized frames as references. The use of a Generative Adversarial Network with U-Net-based generator is justified by its ability to effectively capture fine-grained details and global context, ensuring high-quality, realistic colorization with improved spatial precision and temporal consistency. To enhance the quality of the results, contextual losses, temporal consistency losses, and smoothness losses are applied. The proposed method was implemented using the Python programming language with TensorFlow, a deep learning framework, for building and training the model.

The developed software integrates user input in the form of color hints for keyframes, enabling the creation of customized color solutions. A distinctive feature of the proposed system is the use of an adaptive approach for determining keyframes based on a threshold SSIM value (0.4). This ensures efficient processing of large volumes of video data while maintaining temporal color consistency.

Experiments demonstrated the high quality of the system's performance, with an average L1 loss of 0.016±0.003 and SSIM of 0.93±0.1 on the training dataset.

Future research focuses on improving temporal consistency losses to achieve real-time efficiency. This would enable the proposed solution to be applied in areas such as filmmaking, the media industry, and the automation of old video restoration processes.

Key words: *software, automated video colorization, deep learning, generative adversarial networks, GAN, contextual losses, spatio-temporal consistency, color palette adjustments.*

Introduction. Problem statement. Automated video colorization is a transformative technology that minimizes the substantial manual effort traditionally required for assigning colors to grayscale videos. This process involves using computational methods to predict color channel values for every frame in a video sequence. Depending on the color model employed, these color channels could be in RGB format or in the chromatic channels (a and b) of the Lab color model. This process must maintain both spatial consistency – ensuring accurate and natural color representation within each individual frame – and temporal consistency, which ensures smooth and coherent color transitions between consecutive frames in a sequence.

The Lab color model, widely adopted in colorization tasks, separates color representation into three distinct components: L, a, and b. The L component represents the lightness or brightness of a color and is directly linked to grayscale intensity. The a channel measures the color range from green to red, while the b channel captures the range from blue to yellow. In video colorization, the grayscale information provided by the L channel serves as the foundation for predicting the values of the a and b channels, effectively reconstructing the color information for each frame. The challenge lies in ensuring that the reconstructed colors are visually natural, spatially consistent within each frame, and temporally consistent across the entire video.

To evaluate the effectiveness of video colorization models, several metrics are commonly utilized. Among these, L1 and L2 losses measure the numerical difference between predicted and actual color values, providing a quantitative assessment of accuracy. Structural similarity index (SSIM) evaluates the

perceptual similarity between the colorized output and the ground truth, capturing how natural the result appears to the human eye. Temporal loss specifically assesses the stability of color transitions across frames, while subjective metrics, such as human evaluation, gauge the overall visual appeal and realism of the generated video.

Automated video colorization methods can be broadly categorized into three groups: user-input-based, example-based, and fully automatic approaches. User-input-based methods rely on human-provided hints, such as scribbles or color strokes, to guide the colorization process. Example-based methods use reference images or videos to transfer colors to the target frames. Fully automatic methods, on the other hand, require no external input, relying entirely on the model to infer appropriate colors. Despite its promise, fully automatic colorization poses a significant challenge due to the inherent multimodality of the task: a single grayscale frame may correspond to multiple plausible colorizations, making it difficult for the model to decide on a single correct output.

The objective of this research is to develop an innovative video colorization system that integrates user input to enable customizable color palettes and enhance control over the final output. By leveraging user-provided guidance, the system strikes a balance between automation and creative flexibility. The proposed system is rigorously evaluated using quantitative metrics, such as L1 loss and SSIM, to ensure high-quality results.

The research explores strategies to improve temporal consistency loss, a crucial aspect for achieving smooth and coherent color transitions across frames. These advancements aim to optimize the system for real-time applications in fields like film production, media post-processing, and the restoration of archival video footage.

Related research. The RGB color model is one of the most commonly used color representations in computer vision. It has a significant limitation: the interdependence of its channels makes it impossible to reconstruct one channel based on the others, leading to challenges in interpretability [1]. On the other hand, the Lab color model provides a distinct advantage by separating luminance (L) from chromatic information. In the Lab model, the L channel represents brightness, while the a and b channels capture color ranges (green-to-red and blue-to-yellow, respectively). This separation simplifies colorization tasks, as predicting two chromatic channels (a and b) based on the luminance channel (L) is computationally more efficient compared to predicting all three RGB channels. Transforming between RGB and Lab involves non-linear operations, which can result in data loss during model training. Similarly, the YUV model also separates chroma and luminance while employing a linear transformation from RGB. Despite this linearity, YUV models can produce unexpected artifacts, such as color stains, reducing their reliability for automated colorization tasks [2]. As a result, the Lab color model remains the preferred choice for tasks requiring accurate and consistent automatic colorization.

Early approaches to video and image colorization heavily relied on user input to guide the process. These initial algorithms used color hints, such as user-drawn scribbles, and propagated the color to adjacent regions based on pixel intensity and texture similarities [3]. Over time, advancements were made to improve the effectiveness of these methods. For instance, research [4] introduced a convolutional neural network (CNN) for automatic colorization. While CNN-based methods generally outperformed non-deep-learning techniques in terms of color accuracy and quality, they occasionally struggled with color bleeding into unrelated regions of a frame [5]. To address this issue, the Hybrid Scribble Propagation algorithm [6] was proposed. This method combines permeability-guided filtering (PGF) and an innovative entropy metric to ensure color is propagated only within the intended regions, preventing color mixing between distinct objects.

Example-based colorization methods, also known as reference-based techniques, use a reference image or video to transfer colors to grayscale frames. For instance, the VCGAN model described in [7] utilizes a generative adversarial network (GAN) to achieve example-based video colorization. The discriminator in VCGAN employs a PatchGAN architecture with fewer parameters to optimize performance, while the generator is based on a U-Net architecture. Two ResNet-50-IN feature extractors are integrated into the generator – one processes the input grayscale frame to extract high-level features, and the other processes the previous frame to ensure temporal consistency. The outputs from these networks are then combined to produce the final colorized frame. The authors implemented a two-stage training process: first, they pre-trained the model on the ImageNet dataset to establish robust initial weights; second, they fine-tuned the model on video datasets to ensure both spatial and temporal coherence.

In another study [8], researchers developed a multi-GAN approach to tackle the complexity of video colorization. This technique divides frames into regions based on pixel intensity, creating two

primary classes: C1 for low-intensity regions and C2 for high-intensity regions. The C2 class is further split into clusters, each processed by a separate GAN. By breaking down the task into smaller, more manageable segments, this approach achieved more accurate results for visually complex images and videos. To maintain visual harmony across frames, the authors proposed a technique where each region "inherits" its primary color from the corresponding region in the previous frame. This strategy minimizes significant color shifts across frames, improving the overall temporal consistency.

Modern GAN-based techniques for video colorization focus on enhancing both frame-level quality and sequence-level consistency. One approach employs a conditional GAN (cGAN) with 3D convolutions to evaluate the realism of individual frames and the continuity of the entire sequence. A new metric, termed Color Consistency, was introduced to measure the stability of colors across consecutive frames. Another innovative framework uses two networks, referred to as "f" and "g," to address the one-to-many nature of video colorization. Network *f* generates multiple plausible colorizations for a given frame, producing four distinct solutions in parallel. Network *g* refines these outputs by taking into account temporal inconsistencies, guided by confidence maps. These confidence maps quantify the degree of temporal mismatch between adjacent frames, with values ranging from 0 (low consistency) to 1 (high consistency). The g network adjusts the colors to reinforce consistency across the video. This network can be applied iteratively during testing to achieve even greater temporal harmony.

By incorporating advanced architectures and innovative loss functions, these methods aim to produce visually realistic and temporally consistent colorized videos, paving the way for practical applications in film restoration, media production, and beyond.

Proposed method. The proposed software method focuses on solving two primary issues in video colorization: preserving temporal consistency and generating visually realistic outputs that align with user expectations. The video sequence is initially divided into individual frames. The algorithm identifies the keyframes, which are essentially the initial frames of each scene. In the current implementation, keyframes are determined by comparing the SSIM values between consecutive frames. When the SSIM value of a frame differs from the previous one by a margin exceeding a predefined threshold (set experimentally at 0.4), that frame is designated as the next keyframe (Fig. 1).

The unique feature of this framework lies in its two-stage process: colorizing keyframes and then filling in the remaining inner frames. Keyframes are processed first using an image colorization network. The inputs for the network include the grayscale lightness channel (L channel) of the keyframe (dimensions *H* x *W* x 1), user-provided color hints (ab channels, dimensions *H* x *W* x 2), and a binary mask indicating the locations where the user added color suggestions (dimensions *H* x *W* x 1). Once a keyframe is colorized, the video colorization

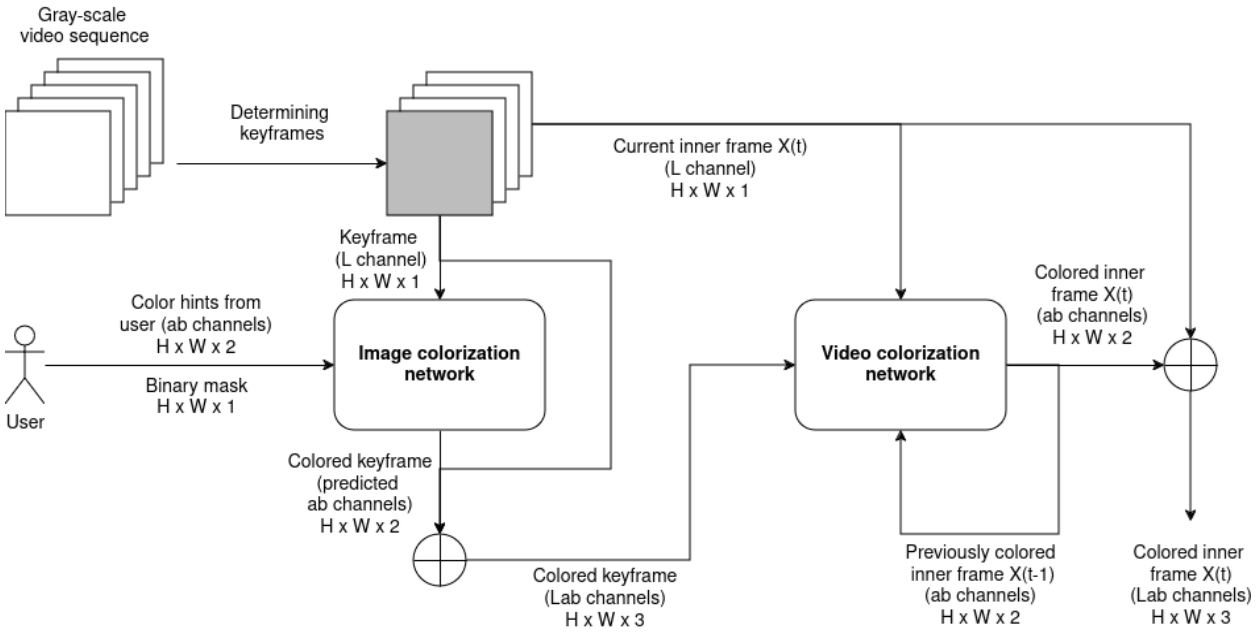


Fig. 1. A schema of the proposed software method

network proceeds to process the inner frames within each scene. For this task, the network relies on two reference frames: the already colorized keyframe and the most recently colorized inner frame. This strategy ensures that both short-term and long-term temporal consistency is maintained across the sequence. The network generates predictions for the ab channels of the current frame, which are then combined with its L channel to reconstruct the complete colorized frame.

The framework allows for flexibility in the choice of network architecture for image and video colorization. In this implementation, a Generative Adversarial Network (GAN) (Fig. 2) with a U-Net-based generator (Fig. 3) is used to achieve high-quality results. Alternative architectures, such as Vision Transformers or more advanced GAN configurations, can also be utilized. The video colorization process can be viewed as reference-based image colorization with two reference inputs.

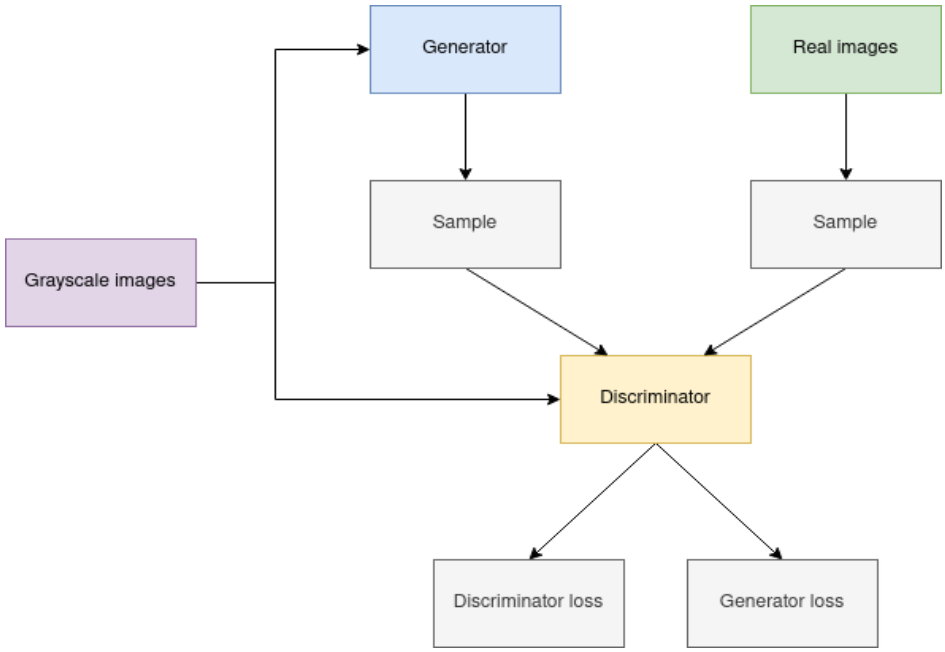


Fig. 2. Conditional GAN. Schema

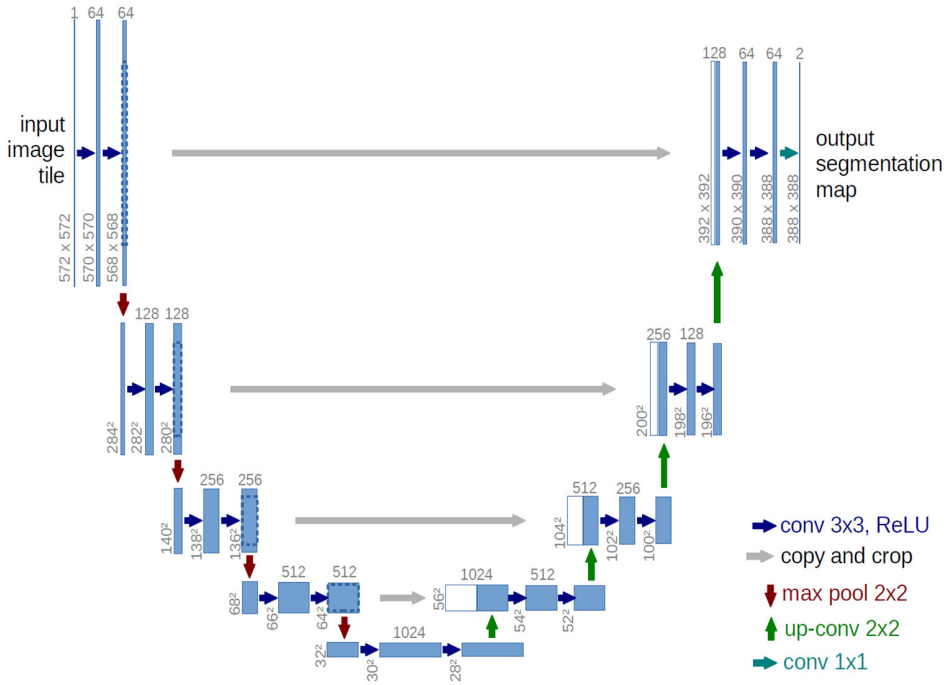


Fig. 3. Generator architecture (U-net). Schema

To enhance the quality of the results, the proposed method incorporates both contextual and temporal consistency losses into the overall loss function for training. Contextual loss is calculated as the mean absolute difference between features extracted from the original and predicted images, specifically using layers 2 to 5 of the VGG19 network. Temporal consistency loss, on the other hand, penalizes discrepancies in color propagation detected through optical flow. A smoothness loss is introduced to promote the spatial coherence of color transitions within each frame.

The developed software is built using a three-tier architecture comprising a web-based client application developed with Angular (TypeScript), a web server powered by FastAPI (Python), and a data layer housing the colorization models implemented in TensorFlow (Python). This design ensures both portability and scalability: the lightweight web application is accessible from most devices, while the web server supports multi-user scalability. The neural networks can be utilized, trained, and tested independently of the web application. A schematic representation of the application architecture is provided in the Fig. 4.

The model integrates a U-Net architecture with attention mechanisms. The U-Net employs an encoder-decoder structure: the encoder progressively reduces the resolution of the input image, extracting contextual features at multiple levels, while the decoder restores the spatial resolution by upsampling the feature maps. Skip connections are used to preserve high-resolution details from the encoder. Alongside the U-Net structure, the model incorporates spatial and channel-wise attention mechanisms. Spatial attention prioritizes regions in the feature maps based on their spatial relevance, while channel attention emphasizes key features by adjusting the importance of individual channels in the feature maps. The inclusion of attention mechanisms allows the network to focus more effectively on color hints and distribute them consistently across image regions.

Research results

The developed video colorization software system incorporates a unique feature that allows users to actively contribute to the colorization process by providing input. Fig. 5 illustrates from left to right: original RGB image, binary mask, color hints, Lchannel with marks applied.

This approach enables the customization of color palettes, making it possible to adapt the colorization to specific user preferences or artistic requirements. By integrating user guidance, the system achieves greater flexibility and control over the final output, ensuring that it meets both technical standards and aesthetic expectations (Fig. 6, 7).

Following the completion of the training process, the video colorization model demonstrates impressive performance. It achieves an L1 loss value of 0.016 with a standard deviation of ±0.003, indicating a high level of accuracy in reconstructing pixel color values. The network attains SSIM score of 0.93 with a deviation of ±0.1, signifying the system's capability to produce visually coherent and detailed outputs. These metrics were calculated using normalized pixel values within the [0, 1] range, reflecting the model's robust ability to handle the nuances of video colorization tasks.

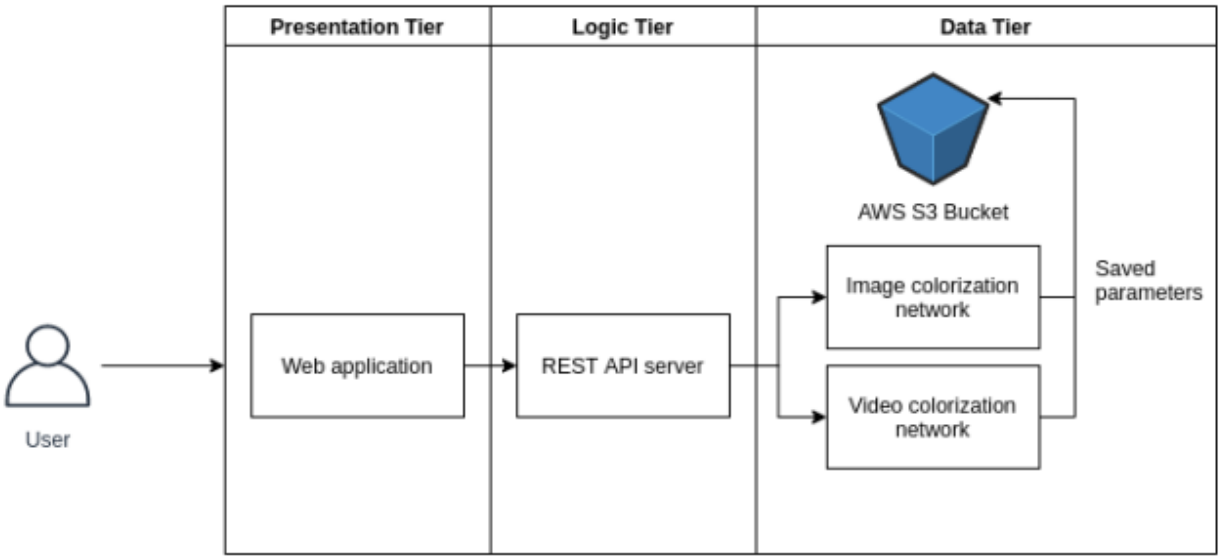


Fig. 4. 3-tier software architecture

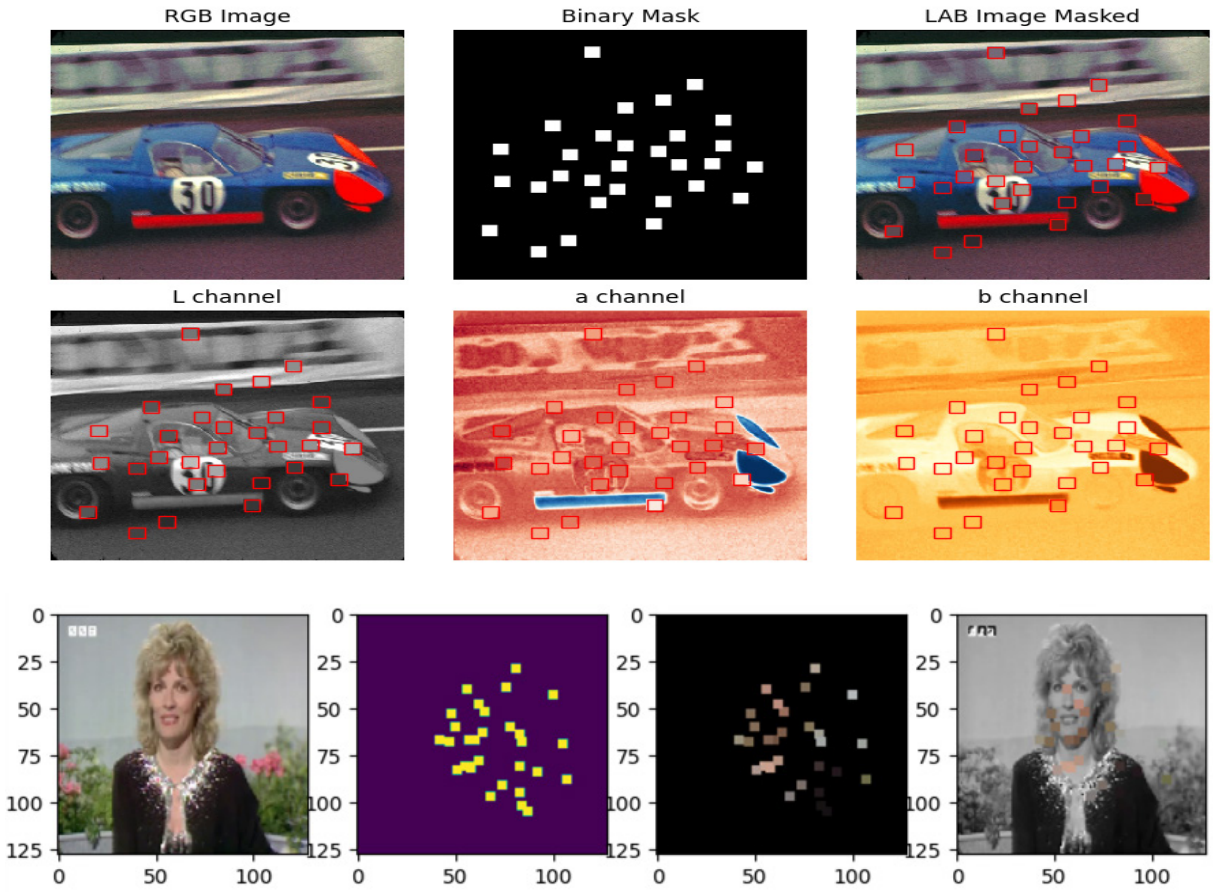


Fig. 5. Simulation of user input on training and testing images (adding color hints)

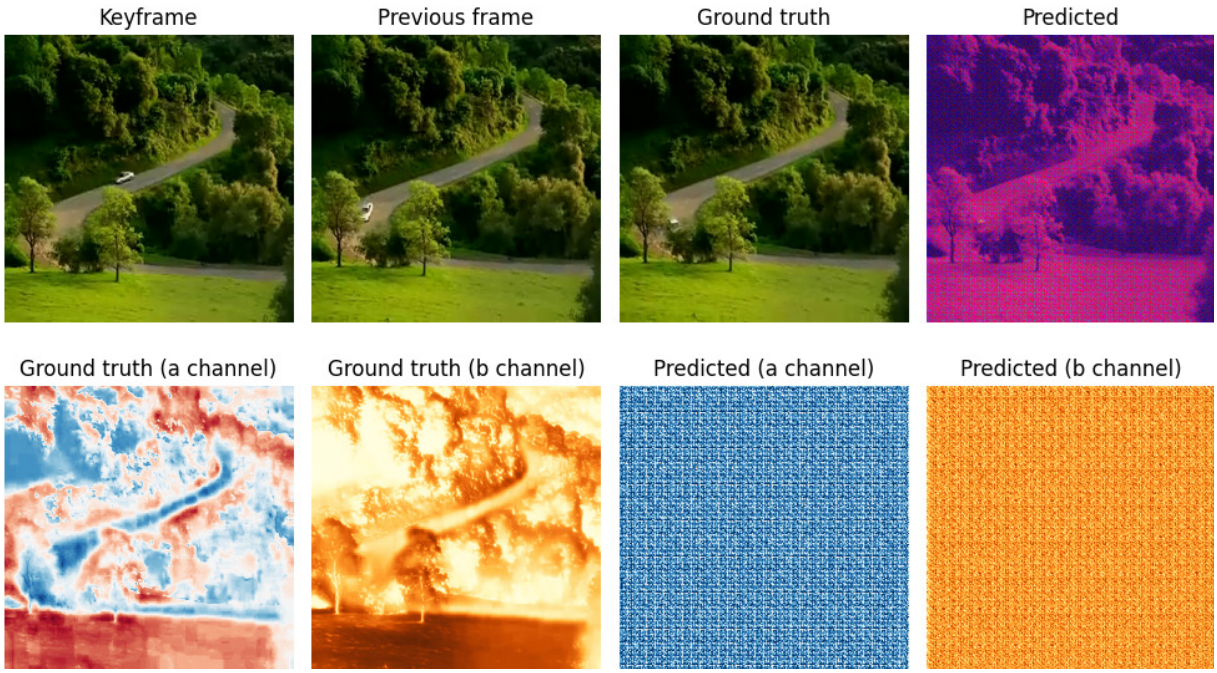


Fig. 6. Values at the beginning of training

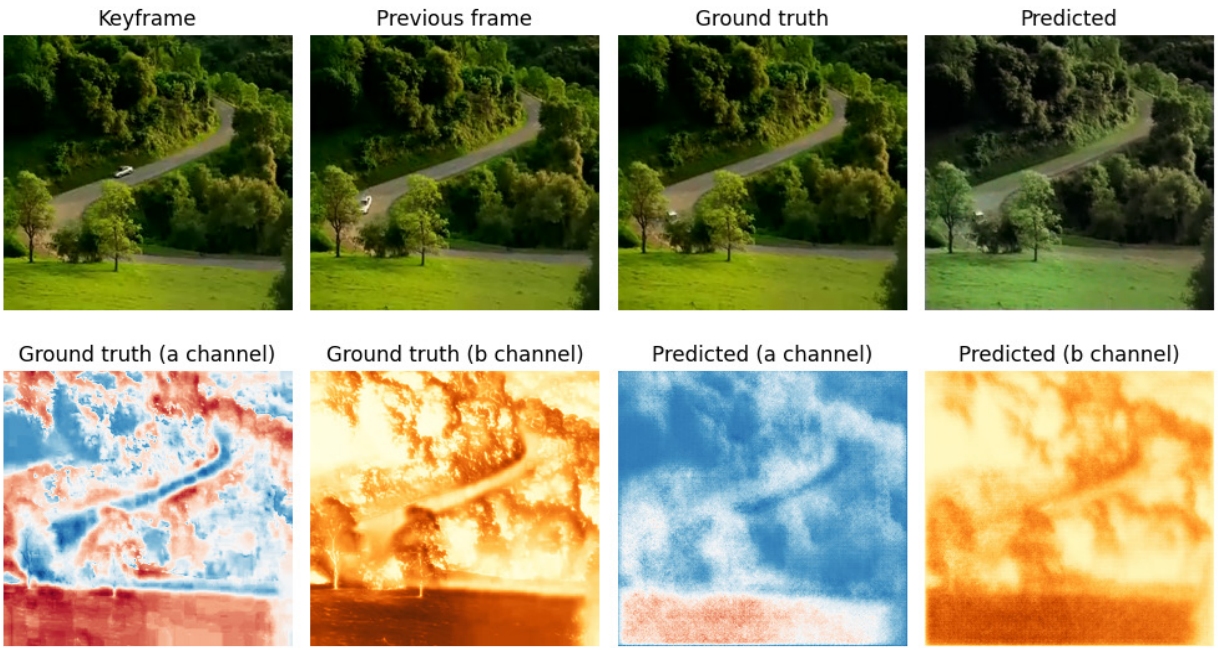


Fig. 7. Values at the end of training

Conclusions and future work. The developed video colorization framework presents a novel solution for enhancing the quality and usability of automated video colorization. By integrating user input through customizable color palettes and leveraging the Lab color model, the method provides a robust balance between automation and manual control. The dual-stage process – keyframe colorization followed by inner frame propagation –effectively addresses the challenges of spatial and temporal consistency, producing visually realistic and coherent results across video sequences. The use of a GAN with a U-Net-based generator, coupled with contextual and temporal consistency losses, ensures high-quality outputs that meet user expectations. The modular design allows for flexibility in adopting alternative architectures, such as transformers or advanced GANs, to further enhance results. The inclusion of smoothness loss and temporal consistency optimization makes the framework well-suited for practical applications in film and media production, where seamless colorization is critical.

Future improvements could focus on refining temporal consistency and incorporating additional user-guided features, such as region-specific coloring or real-time preview capabilities. Expanding the framework to include contextual factors like scene transitions, object tracking, or semantic understanding could enhance its applicability across diverse use cases. The proposed method establishes a strong foundation for integrating AI-driven video colorization into creative workflows, offering a cost-effective and efficient alternative to traditional manual approaches.

Bibliography:

1. Stival L., Pedrini H. Survey on Video Colorization: Concepts, Methods and Applications. *Journal of Signal Processing Systems*. 2023. № 95(6). P. 679–702. DOI: https://doi.org/10.1007/s11265-023-01872-w.

2. Ballester C., Bugea A., Carrillo H., Clément M., Giraud R., Raad L., Vitoria P. Influence of color spaces for deep learning image colorization. *Handbook of Mathematical Models and Algorithms in Computer Vision and Imaging*. 2023. P. 847-878. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-98661-2_125.

3. Levin A., Lischinski D., Weiss Y. Colorization using optimization. *ACM Transactions on Graphics*. 2004. № 23(3). P. 689–694. DOI: https://doi.org/10.1145/1015706.1015780.

4. Zhang R., Zhu J., Isola P., Geng X., Lin A., Yu T., Efros A. A. Real-Time User-Guided Image Colorization with Learned Deep Priors. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. 2017. Vol. 36, Issue 4. P. 1-11. DOI: https://doi.org/10.1145/3072959.3073703.

5. Li S., Liu Q., Yuan H. Overview of Scribbled-Based colorization. *Art And Design Review*. 2018. № 06 (04). P. 169–184. DOI: https://doi.org/10.4236/adr.2018.64017.

6. Dogan P., Aydin T. O., Stefaniski N., Smolic A. Key-Frame based spatiotemporal scribble propagation. *WICED 2015*. 2015. P. 13-20. https://doi.org/10.2312/wiced.20151073.

7. Zhao Y., Po L., Yu W. Y., Rehman Y. A. U., Liu M., Zhang Y., Ou W. VCGAN: Video colorization with Hybrid Generative Adversarial Network. *IEEE Transactions on Multimedia*. 2023. № 25. P. 3017–3032. DOI: https://doi.org/10.1109/tmm.2022.3154600.

8. Jampour M., Zare M. R., Javidi M. Advanced multi-GANs towards near to real image and video colorization. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2022. № 14 (9). P. 12857–12874. DOI: https://doi.org/10.1007/s12652-022-04206-z.

Олещенко Л.М., Тарелкіна К.О. РОЗРОБКА КЕРОВАНОЇ КОРИСТУВАЧЕМ СИСТЕМИ РОЗФАРБОВУВАННЯ ВІДЕО З ВИКОРИСТАННЯМ ГЕНЕРАТИВНОЇ ЗМАГАЛЬНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

У статті представлено метод і програмне забезпечення для автоматизованої колоризації відео з використанням алгоритмів глибокого навчання. Проблема автоматизованої колоризації полягає у передбаченні значень кольорових каналів для кожного кадру на основі вхідних значень яскравості (канал L в кольоровій моделі Lab) із забезпеченням просторово-часової узгодженості. Метою даного дослідження є розробка програмної системи, яка дозволить інтегрувати користувацький ввід для налаштування кольорових палітр та забезпечувати узгодженість кольорів між кадрами. Запропонований метод реалізує двоетапний процес: колоризацію ключових кадрів за допомогою генеративної змагальної мережі GAN (Generative Adversarial Network) із генератором на основі U-Net і колоризацію внутрішніх кадрів із використанням ключових кадрів та попередньо колоризованих кадрів як посилань. Використання генеративної змагальної мережі із генератором на основі U-Net обґрунтоване її здатністю ефективно захоплювати дрібні деталі та глобальний контекст, забезпечуючи якісну, реалістичну колоризацію з покращеною просторовою точністю та часовою узгодженістю. Для покращення якості результатів застосовуються контекстуальні втрати, втрати узгодженості в часі та втрати згладженості. Запропонований метод було реалізовано за допомогою мови програмування Python із використанням TensorFlow, фреймворку для глибокого навчання, для створення та навчання моделі.

Розроблене програмне забезпечення інтегрує в робочий процес користувацьке введення у вигляді кольорових підказок для ключових кадрів, що дозволяє створювати кастомізовані кольорові рішення. Відмінною рисою запропонованої системи є використання адаптованого підходу до визначення ключових кадрів, що базується на пороговому значенні SSIM (0.4). Це забезпечує ефективну обробку великих обсягів відеоданих, зберігаючи часову послідовність кольорів. Проведені експерименти продемонстрували високу якість роботи системи, зокрема, середнє значення втрат L1 склало 0.016±0.003, а SSIM – 0.93±0.1 на навчальному наборі даних.

Подальші дослідження спрямовані на покращення втрат узгодженості в часі для досягнення ефективності в реальному часі. Це дозволить використовувати запропоноване рішення у таких сферах, як кіновиробництво, медіаіндустрія та автоматизація процесів відновлення старих відеоматеріалів.

Ключові слова: *програмне забезпечення, автоматизована колоризація відео, глибоке навчання, генеративні змагальні мережі, GAN, контекстуальні втрати, просторово-часова узгодженість, налаштування кольорових палітр.*

УДК 004.4:004.415:004.678:004.7:004.9
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/22

Орлов М.В.
Національний університет «Львівська політехніка»

Грибовський О.М.
Національний університет «Львівська політехніка»

Жовнір Ю.І.
Національний університет «Львівська політехніка»

Дуда О.М.
Тернопільський технічний університет імені Івана Пулюя

ВІД КОНЦЕПЦІЇ ДО РЕАЛЬНОСТІ: РОЛЬ МЕТОДОЛОГІЇ DEVOPS В ЕКОСИСТЕМАХ IOT

В статті розглядаються сучасні підходи до інтеграції методології DevOps у розроблення та підтримку рішень на базі інформаційних технологій Інтернету речей. У контексті швидкого розвитку Інтернету речей, де кількість підключених пристроїв стрімко зростає, ефективне управління життєвим циклом програмного забезпечення стає критично важливим завданням. Методологія DevOps пропонує принципи безперервної інтеграції та доставки (CI/CD), що дозволяють оптимізувати процеси розроблення, тестування, впровадження та обслуговування IoT-рішень. У статті проаналізовано основні етапи впровадження методології DevOps у різних елементах IoT-екосистем, включаючи хмарну інфраструктуру, мережеві компоненти та кінцеві пристрої. Автори акцентують увагу на проблемах масштабування IoT-рішень та підтримки стабільної роботи у середовищах з високим рівнем динаміки і складності. Дослідження підкреслює, що використання методології DevOps в системах на базі IoT дозволяє знизити час розроблення, забезпечити оперативне тестування оновлень і підвищити надійність систем завдяки моніторингу в реальному масштабі часу. Також розглянуто аспекти кібербезпеки, які є критично важливими для IoT-рішень, зокрема впровадження автоматизованих перевірок безпеки на кожному етапі розроблення. У статті проаналізовано застосування DevOps для управління великими IoT-мережами та підкреслено значення міждисциплінарної співпраці команд розробників, інженерів та операторів. Автори доходять висновку, що DevOps сприяє не лише покращенню якості та швидкості розробки, але й інтеграції нових функцій без порушення роботи системи.

Ключові слова: *CI/CD (Безперервна інтеграція та доставка), автоматизація, хмарна інфраструктура, моніторинг у реальному часі, кібербезпека, масштабування, управління життєвим циклом програмного забезпечення, інтеграція апаратного та програмного забезпечення.*

Постановка проблеми. У сучасному світі інформаційні технології Інтернету речей (Inernet of Things – IoT) стають все більш важливою складовою повсякденного життя та виробних процесів. Стрімке зростання кількості підключених пристроїв та висока складність IoT-систем вимагають формування нових системно-методологічних підходів до розроблення та управління відповідним програмним забезпеченням. Такого роду розлогі функціонально та територіально розподілені інформаційні системи генерують потребу переосмислення чотирьох етапів її життєвого циклу, який включає – системний аналіз, системне проєктування, системну інтеграцію та системне адміністрування. Використання сучасної методології DevOps сприяє об'єднання фази розроблення (Development) та оперування (Operations) для системного забезпечення процесів безперервної інтеграції та доставки програмного забезпечення. Запровадження методології DevOps в інформаційних системах, базованих на IoT є не просто модним трендом, це технологічна необхідність, яку треба обов'язково забезпечувати у випадках, коли метою є реалізація в повній мірі високого потенціалу технологій IoT.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведено аналіз наукових дерел та існуючих підходів дозволив здійснити огляд сучасних нау-

кових джерел щодо використання методології DevOps у сфері IoT. Автори творчо використали методику дослідження, яка була запропонована Кітгенгальмом та Чартером [1].

Проведений авторами аналіз наукових публікацій визначив поточний стан досліджень методології DevOps в контексті побудови систем з використанням технологій IoT, при цьому були виділені ключові тенденції та виклики, що виникають при реалізації таких інформаційно-технологічних рішень. Ряд авторів у своїх дослідженнях наголошують на перевагах методології DevOps у швидкій адаптації IoT-систем до змінних вимог та зростаючого навантаження. Методологія DevOps розглядається як високотехнологічний процес розробки та поширення програмного забезпечення. Він поєднує в собі культуру співпраці та консолідації підходів до управління, технологій кодування та системних технік інтеграції. Методологія DevOps подається як нова інноваційна парадигма та концепція, яка впроваджується в галузі IT і стосується програмного забезпечення та вбудованих систем в таких аплікаціях як робототехніка та інтелектуальні агенти. Екосистема IoT подається як набір фізичних пристроїв, таких як давачі та виконавчі пристрої, зінтегрованих в розлогих мережевих структурах, що містять набори серверів та шлюзів, які забезпечують надійне їх підключення та взаємодію. Зазначені пристрої можуть інсталюватись на трьох рівнях, що реалізують три обчислювальні концепції, а саме граничних обчислень, туманних обчислень та хмарних обчислень [2].

У ряді робіт аналізуються питання, як саме розподілені хмарні середовища та інфраструктура як код (IaC) полегшують масштабування великих IoT-мереж. Дослідники вважають безперервну інтеграцію [3] процесом розроблення, у якому розробники та інтегратори імплементують код у спільні інструменти. Це базова практика, яка підтримує безперервність роботи програмного забезпечення розумних агентів, які є основою систем, на базі технологій Інтернету речей. Базуючись на конкретних характеристиках, були розроблені та розгорнуті інформаційні системи з використанням ряду фреймворків для систем на базі IoT. Автори запропонували метамодель інформаційних технологій IoT, що спрямовано на стандартизацію існуючих архітектур систем на базі цієї технології, а також тих, які будуть запропоновані в майбутньому. У певній кількості публікацій розглядаються питання впровадження моніторингових інструментів у IoT-системах, що працюють у масштабі реального часу з використанням хмарних технологій. Це дозволяє оперативно реагувати на зміни стану системи та вчасно виявляти аномалії [4]. Програми, які відстежують події та збирають дані з давачів, розгортаються на рівнях пограниччя, туману та хмар. У роботі подано загальну метамодель екосистем IoT, яка базується на мікросервісах і підтримується Docker як інструментом контейнеризації та Ansible як інструментом моніторингу. Запропонована метамодель є поданням 5 метамоделей, таких як IoT-мікросервіси – Ansible – Docker – Kubernetes [5]. Проаналізовані результати наукових досліджень підтвердили, що методологія DevOps є ключовою методологією підвищення ефективності та надійності IoT-екосистем. Використання методології DevOps у інформаційних системах, базованих на технологіях IoT, забезпечує швидку адаптацію до змін, оптимізує процеси розроблення та підтримки прийняття рішень, а також підвищує рівень безпеки систем загалом. Водночас відзначаються виклики, пов'язані з інтеграцією методології DevOps у різнорідних IoT-середовищах, в яких поєднуються чисельні різнотипові апаратні та програмні компоненти.

Постановка завдання. Метою статті є проаналізувати роль методології DevOps в екосистемах IoT та обґрунтувати шляхи її впровадження для оптимізації процесів розроблення, тестування, розгортання та обслуговування IoT-рішень. Об'єкт дослідження – екосистеми Інтернету речей (IoT), які включають апаратні та програмні компоненти, хмарні сервіси, мережеві інфраструктури та засоби автоматизації. Предмет дослідження – методологія DevOps та її вплив на процеси управління життєвим циклом IoT-рішень, зокрема на розроблення, інтеграцію, тестування, розгортання, масштабування та моніторинг такого класу систем. Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження: провести аналіз концепцій та принципів методології DevOps у контексті їх застосування в IoT-екосистемах; вивчити аспекти масштабованості та надійності IoT-систем, які реалізуються завдяки методології DevOps; розробити рекомендації для впровадження методології DevOps у IoT-проєктах з урахуванням їх специфіки та широкого спектру вимог.

Виклад основного матеріалу. Синергія методології DevOps та інформаційних технологій класу IoT (див. Рисунок 1) є критично важливою в прискоренні інновацій, підвищення надійності, живучості та безпеки розлогих системних IoT-рішень. Практики DevOps сприяють автоматиза-

ції багатьох аспектів розроблення та розгортання IoT-застосунків. Вони включають автоматизоване тестування, збірку та розгортання програмного забезпечення, що дозволяє швидше виявляти та виправляти помилки, зменшуючи ризики людських помилок і суттєво підвищуючи надійність реалізації широкої партитури процесів. Використання Безперервної Інтеграції (або Continiuous Integration – в подальшому використовуватимемо термін «CI/CD») у розробці інформаційних систем на основі технологій IoT дозволяє частіше випускати оновлення та нові функції програмних продуктів. Це особливо важливо для інтелектуальних IoT-пристроїв, які потребують регулярних оновлень для підтримки належного рівня безпеки та розширення функціональності. Водночас використання CI/CD забезпечує швидке та безпечне впровадження змін, що підвищує рівень задоволеності користувачів такого роду систем. DevOps містить функцію безперервного моніторингу IoT-систем, що дозволяє вчасно виявляти аномалії та проблеми. Це допомагає запобігати збоям та забезпечувати стабільну роботу пристроїв. Окрім того, моніторинг дозволяє збирати дані для аналізу продуктивності та багатопараметричної оптимізації інформаційних систем.

Використання концептуального аспекту DevOps-інфраструктура як код спрощує процеси управління складною IT інфраструктурою в системах, базованих на технологіях IoT. Розробники можуть швидко відтворювати налаштування IT інфраструктури, що полегшує масштабування та забезпечує консистентність середовищ. Така функціональність є особливо важливою для інформаційних систем, що реалізовані на великих, розлогих IoT-мережах, коли необхідно керувати та оркеструвати велику кількістю пристроїв.

Використання контейнерів та мікросервісів у архітектурі систем на основі технологій IoT підвищує гнучкість та масштабованість таких систем. Контейнери дозволяють ізолювати застосунки та зменшити рівень їх взаємозалежності, що спрощує процедури розгортання та управління. Мікросервіси дозволяють розробляти застосунки

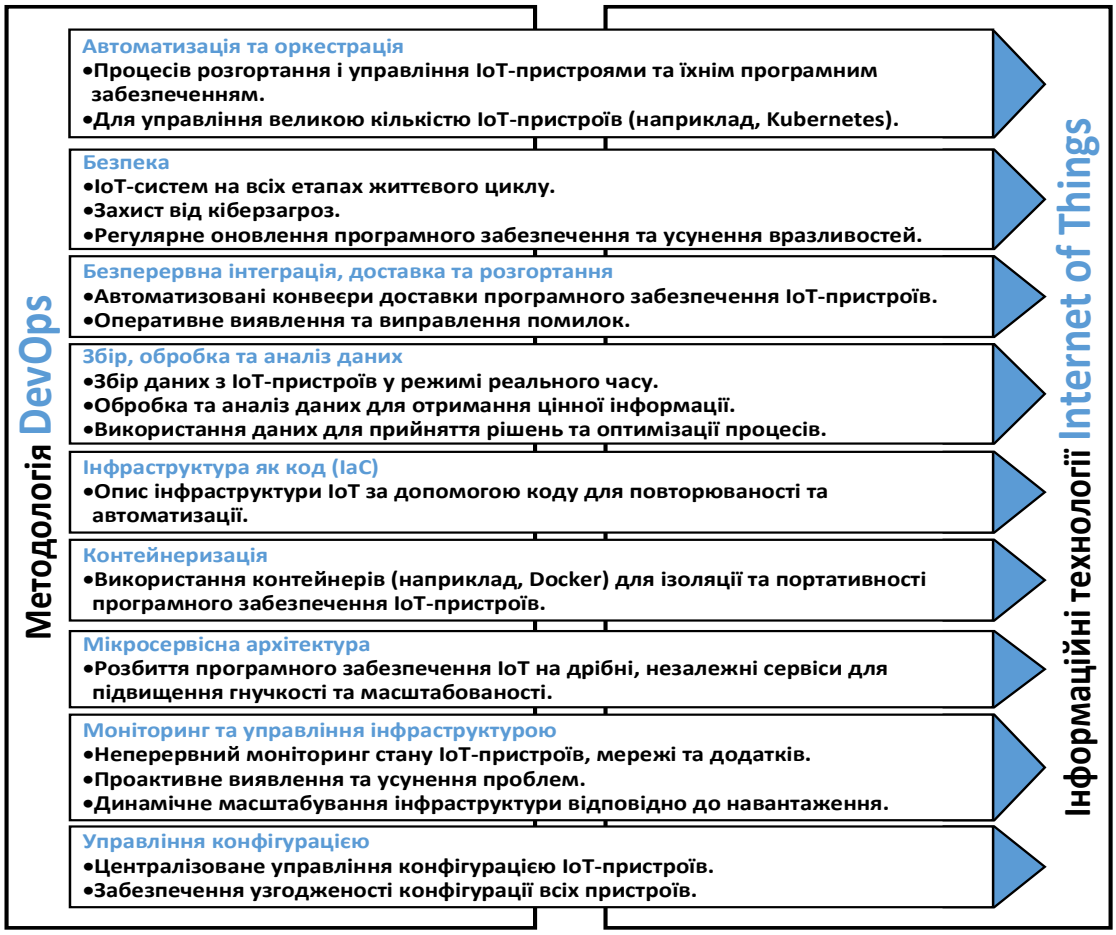


Рис. 1. Взаємодія методології DevOps та інформаційних технологій класу IoT / The interaction of the DevOps methodology and information technologies of the IoT class

як набори незалежних сервісів, що полегшує реалізацію процедур їх оновлення та масштабування.

Для визначення зв'язків методології DevOps та інформаційних систем, базованих на інформаційних технологіях класу IoT автори роботи [6] сформулювали три дослідницькі питання (RQ).

RQ1. Які концепції DevOps застосовуються в контексті програмних продуктів, що реалізують інформаційні системи на основі технологій IoT?

Було визначено п'ятнадцять концептуальних аспектів методології DevOps і співвіднесенно їх з процесами автоматизації процедур розгортання [6]. Результати подані на рисунках 2 та 3.

RQ2. Які переваги від впровадження DevOps у програмних системах, базованих на технологіях IoT?

Було ідентифіковано 4 переваги, а результати запиту наведено нижче. Застосовуючи DevOps фреймворк для IoT ви надаєте структуру для ефективного управління IoT-системами, що підвищує продуктивність і зменшує час на інтеграцію з іншими компонентами вашого рішення. Використання хмарних обчислень для хостингу серверів (бекенду) дозволяє легко масштабувати і зберігати дані, забезпечуючи безпечний доступ з будь-якого місця (локації). Операбельність із

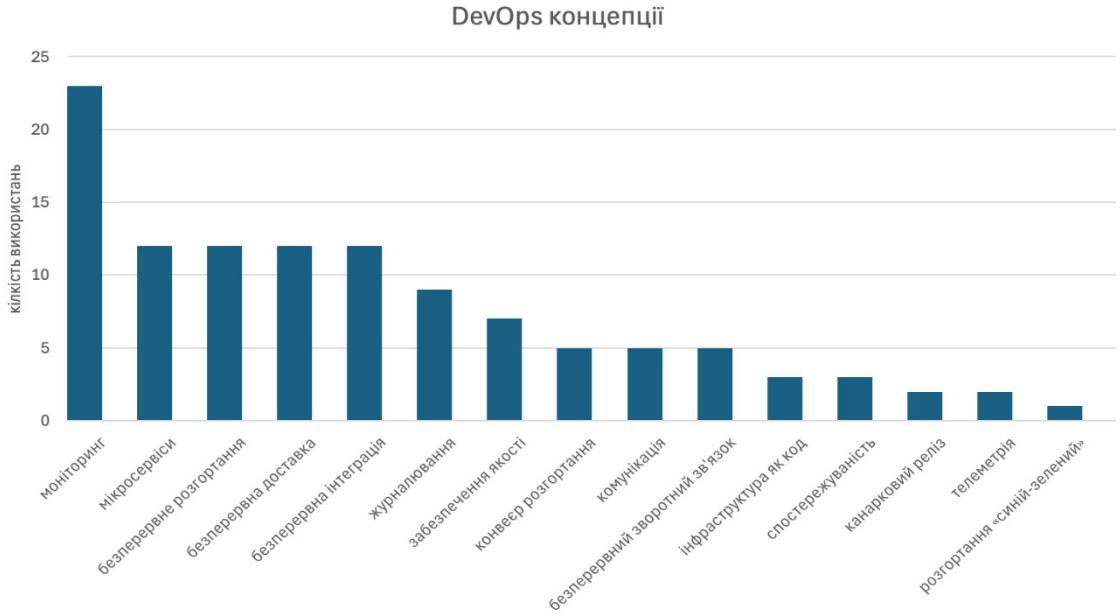


Рис. 2. Концептуальні аспекти DevOps, які застосовуються в програмних продуктах, що реалізують функціонал інформаційних систем з використанням технологій IoT / Conceptual aspects of DevOps, which are used in software products that implement the functionality of information systems using IoT technologies

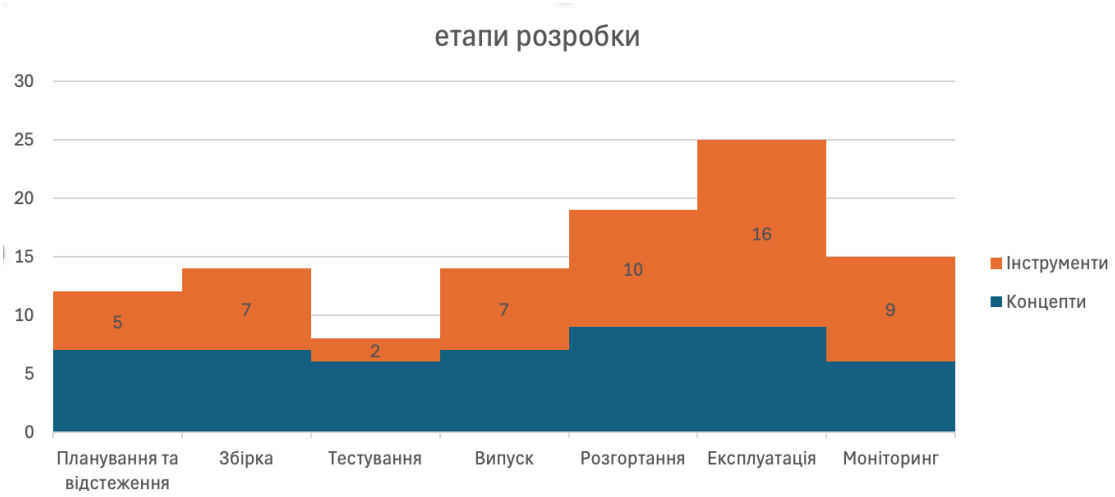


Рис. 3. Розподіл кількості концептуальних аспектів методології DevOps на різних етапах розроблення програмних продуктів/ Distribution of the number of conceptual aspects of the DevOps methodology at different stages of the development of software products

використанням контейнерів спрощує підтримку й оновлення, що знижує витрати на обслуговування. Мікросервіси сприяють формуванню малих команд, що сприяє швидшій розробці, ізольованому розгортанню та стабільності кожної компоненти.

RQ3. Які виклики виникають при впровадженні DevOps у програмних системах, базованих на технологіях IoT?

Було ідентифіковано виклики. Результат запиту дозволив сформувати таке твердження: *При впровадженні методології DevOps у програмних системах, базованих на технологіях IoT, виникає ряд викликів, пов'язаних з масштабуванням, управлінням різнорідними пристроями, забезпеченням належного рівня безпеки, підтримкою безперервного розгортання на обмежених ресурсах, а також складністю налаштування моніторингу та автоматизації в умовах нестабільного зв'язку*. Реалізуючи план нашого дослідження ми продовжили роботу по формуванню відповідей на ряд додаткових питання, які наведені нижче:

RQ4. Які інструменти та технології методології DevOps найчастіше використовуються в розробці IoT-застосунків?

Провівши аналітичне дослідження можемо стверджувати про виявлення шести груп інструментів (див. рис. 4).

Подані вище групи інформаційно-технологічних інструментів дозволяють забезпечити безперервну інтеграцію та доставку, автоматизацію процесів, моніторинг та управління конфігураціями, що є критично важливими для успішного розроблення IoT-застосунків [7–9].

RQ5. Методи забезпечення безпеки DevOps, які використовуються в IoT-застосунках.

Інтеграція факторів безпеки на кожному з етапів розроблення засобами методології DevSecOps (Розроблення. Безпека. Операційність) забезпечує проактивний підхід до незалежного рівня забезпечення безпеки. Це включає автоматизоване сканування вразливостей, тестування рівнів безпеки та впровадження кращих практик безпеки [10]. Дослідження належного рівня безпеки засобами методології DevOps в IoT-застосунках вимагає впровадження спеціальних методів та практик, оскільки IoT-застосунки часто містять унікальні безпекові ризики, пов'язані з фізичними пристроями, мережами і даними. Ось кілька ключових методів убезпечення DevOps процесів, які застосовуються в IoT-застосунках (див. рис. 5).

Рис. 4. Інструменти методології DevOps, що найчастіше використовуються в розробці IoT-застосунків/ DevOps tools most commonly used in IoT application development

Рис. 5. Ключові методи убезпечення DevOps процесів в IoT-застосунках / Key methods of ensuring DevOps processes in IoT applications

Рис. 6. Використання методології DevOps в процесах масштабування IoT-систем / Using the DevOps methodology in the processes of scaling IoT systems

RQ6. Як методологія DevOps сприяє масштабованості IoT-систем?

Методологія DevOps відіграє ключову роль у забезпеченні масштабованості IoT-систем завдяки використанню методів автоматизації, постійної інтеграції, моніторингу та швидкого реагування на зміни (див. Рис. 6). Однією з ключових переваг методології DevOps є її моделюючі потужності і здатність створювати платформи для моделювання IoT-систем. Це дозволяє ефективно тестувати та впроваджувати складні IoT-рішення, зменшуючи ризики та підвищуючи надійність. Методологія DevOps загалом надає широкий спектр можливостейщодо імітації реальних умов експлуатації IoT-систем, що забезпечує точніше тестування та виявлення потенційних проблем до моменту їх фактичної появи в продуктивному середовищі.

Контейнеризація є важливою складовою методології DevOps, оскільки дозволяє легко створювати ізольовані середовища для моделювання різних компонентів IoT-системи. Наприклад, використання Docker дозволяє розробникам створювати контейнери, що точно відтворюють середовище, в якому будуть працювати IoT-пристрої. Це спрощує тестування взаємодії між різними частинами системи та дозволяє швидко вносити зміни. Використання оркестрування контейнерів за допомогою Kubernetes дозволяє моделювати масштабовані IoT-архітектури, тестувати їх стійкість та ефективність у різних умовах навантаження. Моніторинг та логування є важливими аспектами методології DevOps для IoT-систем. Використання рішень для централізованого моніторингу (наприклад, Prometheus та Grafana) дозволяє збирати метрики та аналізувати роботу кожного компонента системи в реальному масштабі часу. Це дає можливість виявляти потенційні проблеми ще до їх виникнення у продуктивному середовищі. Централізоване логування за допомогою ELK stack (Elasticsearch, Logstash, Kibana) забезпечує зручний спосіб зберігання та аналізу логів з усіх IoT-пристроїв, що допомагає швидко знаходити та усувати помилки. Методологія DevOps також забезпечує можливості для симуляції навантаження та стрес-тестування IoT-систем. За допомогою інструментів, таких як Apache JMeter або Gatling, можна створювати симуляції реального навантаження на систему, що дозволяє виявляти вузькі місця та покращувати продуктивність. Наприклад, можна моделювати одночасне підключення тисяч IoT-пристроїв та аналізувати, як система справляється з таким навантаженням. Проведення стрес-тестів дозволяє оцінити стійкість IoT-системи до високих навантажень та виявити можливі проблеми в умовах пікових навантажень.

Управління конфігураціями та інфраструктурою як кодом (IaC) автоматизує створення та налаштування інфраструктури для IoT-систем. Інструменти для управління конфігураціями, такі як Ansible, Chef або Puppet, дозволяють автоматично налаштовувати середовища розробки, тестування та продуктивного використання. IaC (наприклад, Terraform) забезпечує консистентність середовищ, що знижує ризик виникнення проблем через від-

мінності в конфігураціях. Впровадження та активне використання методології DevOps для моделювання IoT-систем забезпечує значні переваги, серед яких висока точність тестування, швидке виявлення та виправлення помилок, а також досягнення підвищеної надійності системи. Це робить DevOps незамінним інструментом для розробників та операторів IoT-рішень, сприяючи підвищенню якості та ефективності їх роботи.

Висновки. За результатами проведених досліджень можемо стверджувати, що кращими DevOps практиками для інформаційних систем, що реалізуються на основі технологій IoT визначено наступні: Безперервна інтеграція/ безперервна доставка (CI/CD) що є основною практикою DevOps вона відіграє важливу роль у розробці IoT. Вона передбачає автоматизацію процесів доставки програмного забезпечення та змін інфраструктури. Для систем на основі технологій IoT інтеграція CI/CD сприяє підтримці якості програмного забезпечення, підвищенню ефективності та прискоренню процесів доставки оновлень або нових функцій на пристрої. Водночас це забезпечує можливість легких відкатів попередніх змін, зменшуючи при цьому впливи потенційних індукованих проблем. Практичні втілення інформаційних систем, базованих на технологіях IoT проаналізовані в процесі цієї наукової розвідки, підтверджують корисність зазначених процедур.

Список літератури:

1. Kitchenham B., Charters S. Guidelines for Performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering Technical Report EBSE-2007-01. – Keele University and University of Durham, UK, 2007. 65 p. – Available at: https://www.dur.ac.uk/resources/ebse/EBSE2007-01.pdf. Retrieved from https://legacyfileshare.elsevier.com/promis_misc/525444systematicreviewsguide.pdf

2. Khalyly B., Belangour A., Erraissi, A., Banane M. Meta-model approach of applied DevOps on Internet of Things ecosystem. *IEEE 2nd International Conference on Electronics, Control, Optimization and Computer Science (ICECOCS)*. 2020. P.1–6. https://doi.org/10.1109/ICECOCS50124.2020.9314552

3. Kim G., Willis J., Debois P., Humble J. The DevOps Handbook: How to Create World-Class Agility, Reliability, and Security in Technology Organizations. Portland: IT Revolution Press, 2016. 480 p. Available at: https://itrevolution.com/book/the-devops-handbook..

4. Díaz J., Pérez-Martínez J., López-Peña, M., Mena, G., Yague, A. Self-service cybersecurity monitoring as enabler for DevSecOps IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 100283–100295. – https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2930000. Available at: https://ieeexplore.ieee.org/document/8784768.

5. Dave D. M., Bhanushali A. Continuous integration and continuous deployment (CI/CD) for AI-enabled IoT systems. 2023. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/380694991_Continuous_Integration_and_Continuous_Deployment_CICD_for_AI-Enabled_IoT_Systems

6. Botta A., De Donato W., Persico V., Pescapé A. Integration of cloud computing and Internet of Things: A survey. *Future Generation Computer Systems.* 2016. Vol.56. P.684–700. https://doi.org/10.1016/j.future.2015.09.021

7. Pereira I. M., de Senna Carneiro, T. G., Figueiredo, E. Understanding the context of IoT software systems in DevOps. *arXiv*. 2021. 2103.12345. Available at: https://arxiv.org/abs/2103.12345. https://doi.org/ 10.48550/arXiv.2103.12345.

8. Maayan, G. D. A DevOps guide to IoT technology. Retrieved from https://devops.com/a-devops-guide-to-iot-technology. [Place of publication: if available]. [Publisher: if available], 2023.

9. Apprecode. (n.d.). DevOps in the creative industries: Streamlining content creation workflows. [Place of publication: if available]. [Publisher: if available], [n.d.] Retrieved from https://apprecode.com/blog/devops-in-iot-accelerating-innovation-in-the-internet-of-things.

10. Michalowski, M. Using DevOps practices to enhance IoT security. Retrieved from https://www.iotforall.com/using-devops-practices-to-enhance-iot-security.

Orlov M.V., Hrybovskyi O.M., Zhovnir Yu.I., Duda O.M. FROM CONCEPT TO REALITY: THE ROLE OF DEVOPS METHODOLOGY IN IOT ECOSYSTEMS

The article explores contemporary methodologies for integrating DevOps practices into developing, deploying, and maintaining Intrnet of Things (IoT) solutions. Given the explosive growth of IoT and the increasing volume of interconnected devices worldwide, the efficient management of software lifecycles has become an essential task for businesses and technology developers. The DevOps methodology provides a framework centered on the principles of continuous integration and continuous delivery (CI/CD), aiming to streamline the processes of coding, testing, deployment, and ongoing support for IoT solutions. The paper delves into the intricacies of applying DevOps at different levels of the IoT ecosystem, encompassing cloud-based infrastructures, communication networks, and edge computing devices. The authors offer a detailed analysis of

how automation is pivotal in coordinating software and hardware interactions, ensuring seamless integration and minimizing the potential for errors. Emphasis is placed on the unique challenges associated with scaling IoT solutions, such as managing the vast data generated by devices and maintaining system stability in highly dynamic and complex operational environments. In the context of optimizing IoT deployments, the article highlights how the DevOps approach helps shorten development cycles and enhance the efficiency of testing updates. Organizations can rapidly address issues by implementing continuous monitoring and real-time data analysis, improving system reliability and robustness. The research further addresses cybersecurity concerns inherent in IoT applications, advocating for automated security assessments and integrating protective measures throughout the development lifecycle. These strategies ensure that vulnerabilities are identified and mitigated proactively, thus reinforcing the overall security posture of IoT systems. The article presents illustrated case studies that demonstrate successful implementations of DevOps strategies in managing extensive IoT networks. These examples showcase the benefits of interdisciplinary collaboration between software developers, network engineers, and operational teams. These examples underscore the significant impact of adopting a DevOps culture on IoT projects' efficiency and scalability while facilitating the seamless addition of new functionalities without disrupting existing services. The authors conclude by asserting that DevOps principles not only elevate the quality and speed of IoT software development but also enable a more adaptive and resilient technological infrastructure. The article offers practical recommendations for professionals, including developers, system architects, and project managers, emphasizing strategies to enhance productivity and responsiveness in IoT environments. These insights are precious for those seeking to implement DevOps methodologies to improve coordination, optimize resource utilization, and drive continuous innovation in the rapidly evolving IoT landscape.

Key words: *CI/CD (Continuous Integration and Delivery), automation, cloud infrastructure, real-time monitoring, cybersecurity, scaling, software lifecycle management, hardware-software integration.*

УДК 004.75
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/23

Пацьора А.А.
Національний університет біоресурсів і природокористування України

КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ІНФРАСТРУКТУРИ WEB 3.0 ПРИ ОПРАЦЮВАННІ ПРЕДМЕТНО-ОРІЄНТОВАНИХ СЦЕНАРІЇВ

Стаття присвячена розробленню концептуальної моделі інфраструктур Web 3.0, орієнтованої на підтримку предметно-орієнтованих сценаріїв у таких галузях, як Інтернет речей (IoT), розподілені фінанси, управління цифровими активами, смарт-контракти та інші варіанти використання, які потребують гнучкості та адаптивності. Основна увага приділяється створенню такої архітектури Web 3.0, яка за рахунок децентралізованих принципів дозволяє оптимізувати обробку даних, підвищити рівень безпеки і забезпечити інтеграцію специфічних вимог до кожної предметної області. Концептуальна модель Web 3.0 включає децентралізовану інфраструктуру, засновану на взаємодії незалежних вузлів, які взаємодіють через безпечні протоколи та смарт-контракти. Такий підхід забезпечує стійкість системи до збоїв і відмов, а також дозволяє обійтися без єдиної центральної точки управління, що підвищує надійність і знижує вразливість до атак. Токенізація ресурсів, що також інтегрується в дану архітектуру, дозволяє визначити права доступу, відстежувати зміни власності та здійснювати обмін цифровими активами, що є особливо корисним для розподілених фінансових додатків і систем управління цифровими активами. Використання смарт-контрактів у цій моделі значно спрощує реалізацію складних логік обробки даних, таких як автоматизоване виконання умовних операцій між учасниками системи, а також створює можливості для автоматизації процесів у різних галузях. Це дозволяє Web 3.0 не тільки обробляти дані, але й забезпечувати прозорість операцій, зберігаючи при цьому конфіденційність і захищеність інформації. Завдяки використанню смарт-контрактів у рамках інфраструктури Web 3.0 можна створювати автоматизовані системи взаємодії, що адаптуються до потреб конкретної предметної області, полегшуючи інтеграцію з існуючими системами та забезпечуючи сумісність з іншими децентралізованими платформами.

Для візуалізації цієї концептуальної моделі застосовуються UML-діаграми, які дозволяють створити зрозумілу та гнучку структуру системи Web 3.0. UML надає можливість розробникам і архітекторам чітко побачити компоненти, включаючи децентралізовані вузли, сховища даних, елементи безпеки і механізми контролю доступу. Крім того, UML-діаграми демонструють зв'язки між компонентами, що дозволяє не лише краще розуміти їх взаємодію, а й знаходити можливості для оптимізації. Такий візуальний підхід полегшує планування і впровадження адаптивної архітектури Web 3.0, що задовольняє потреби конкретних доменних сценаріїв і надає чіткі інструменти для інтеграції з іншими сервісами та платформами. Інфраструктура Web 3.0 також передбачає використання механізмів контролю доступу, які забезпечують високий рівень захисту даних у децентралізованому середовищі. Розподіл повноважень і забезпечення конфіденційності стають ключовими аспектами, оскільки користувачі отримують повний контроль над своїми даними, а механізми Web 3.0 запобігають несанкціонованому доступу. Це особливо актуально для сценаріїв, де персональні або фінансові дані потребують захисту, а також для екосистем, де взаємодія відбувається між великою кількістю учасників із різними рівнями доступу.

Ключові слова: *Web 3, Концептуальна модель, предметно-орієнтовані сценарії, UML-діаграми, безпека даних, смарт-контракти, токенізація, децентралізовані додатки (DApps), інтернет речей (IoT інтероперабельність).*

Постановка проблеми. Web 3.0 – це майбутнє Інтернету, яке зосереджується на створенні децентралізованої та більш демократизованої мережі. Мета полягає в тому, щоб створити мережу, де користувачі матимуть повний контроль над своїми даними, а не залежати від благодаті кількох великих компаній, таких як Google або Facebook. Термін Web 3.0 вперше був введений Джоном Маркоффом у 2006 році у статті New York Times [1]. З тих пір Web 3.0 перетворився на більш широку концепцію, яка охоплює цілий ряд технологій, таких як блокчейн, децентралізовані програми (dApps) та Інтернет речей (IoT). Потенціал Web 3.0 величезний, і він може зробити революцію в тому, як ми взаємодіємо з Інтернетом.

Існуючі моделі та рішення не завжди адекватно відображають складність і динаміку цих сценаріїв. Це може призвести до проблем з масштабованістю, продуктивністю, безпекою даних і поганої інтеграції між різними компонентами системи. Тому важливо розробити концептуальні моделі, які ефективно представляють інфраструктуру Web 3.0 і забезпечують безперешкодну взаємодію між її елементами.

Запропонована модель має бути достатньо універсальною, щоб враховувати різні тематичні сценарії та адаптуватися до змін у технологічному середовищі. Для візуалізації моделі буде використано UML-діаграму, що ілюструє взаємодію між структурними та функціональними аспектами інфраструктури Web 3.0 і тематичними сценаріями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Web 3.0 – концепція розвитку інтернету наступного покоління, яка будується навколо ідеї децентралізації. Передбачається, що нова онлайн-мережа дозволить людям повноцінно володіти і управляти створеним ними контентом, анонімізує персональні дані, стане більш відкритою і безпечною [2].

Теорії інтернету майбутнього обговорюються ще з 1998 року, коли творець всесвітньої павутини Тім Бернерс-Лі представив ідею семантичного інтернету, в якому зміст сайтів описувалося б за допомогою метамови і було зрозумілим комп'ютера [3].

Тім О'райлі, автор терміна Web 2.0, теж вважав, що Web 3.0 буде пов'язаний з семантикою, завдяки якій інтернет зможе взаємодіяти з фізичним світом (по суті, описавши інтернет речей) [4]. Проте, він рекомендував не ототожнювати інтернет з семантичною павутиною, оскільки розраховував, що з 2010 по 2020 рр. відбудуться нові технологічні зрушення.

Офіційний термін Web 3.0 був сформульований у 2007 році Джейсоном Калаканісом, керівником Netscape.com. він асоціював інтернет майбутнього зі створенням якісного контенту: онлайн-ресурси перестануть бути одноманітними і марними, контент почнуть створювати професіонали за допомогою якоїсь платформи.

Саму платформу Калаканіс не описав, але сьогодні очевидно, що Web 3.0 – це не одна система, а багатовимірне поняття, яке охоплює відразу багато сегментів.

Web 3.0 – це наступний етап в історії інтернету Після Web 1.0 та Web 2.0.

Ось кілька ключових моментів про Web 3.0, які треба знати:

1. Децентралізація. Основною метою Web 3.0 є створення децентралізованої мережі, в якій немає центрального органу, що контролює дані. Це означає, що користувачі матимуть повний контроль над своїми даними і зможуть вирішити, хто може отримати до них доступ.

2. Технологія блокчейн. Блокчейн – це ключова технологія, що лежить в основі Web 3.0. блокчейн – це розподілений реєстр, який веде облік усіх транзакцій безпечним та прозорим способом. Це технологія, яка використовує такі криптовалюта, як біткоіни і ефіріум.

3. Децентралізовані програми. децентралізовані Програми, або dApps, – це програми, що працюють у децентралізованій мережі, такій як блокчейн. Ці програми розроблені таким чином, щоб бути більш безпечними та прозорими, ніж традиційні програми.

4. Смарт-контракти. Смарт-контракти – це самореалізаційні контракти, які зберігаються в блокчейн і. Вони призначені для автоматизації процесу перевірки та виконання контракту. Розумні контракти можуть використовуватися для різних цілей, таких як перевірка цифрової ідентичності, управління ланцюгами поставок та фінансові операції.

5. Інтернет речей. Інтернет речей (IoT) – це мережа взаємопов'язаних пристроїв, в які вбудовані датчики, програмне забезпечення та інші технології. Ці пристрої можуть взаємодіяти один з одним і обмінюватися даними без втручання людини. Інтернет речей є ключовим компонентом web 3.0, оскільки він дозволяє створювати децентралізовані мережі пристроїв, які можуть взаємодіяти один з одним безпечним і прозорим способом.

Web 1.0 виник у 90-х роках, коли з'явилася можливість демонструвати вміст на статичних веб-сайтах. Творцями контенту були власники сайтів, а користувач міг лише шукати і споживати інформацію [5].

Поточний етап Web 2.0 орієнтований на користувача і зростання обсягів інформації. Вже можна самостійно створювати контент, керувати ним і взаємодіяти з іншими користувачами. У цей період активно розвиваються блоги, соціальні мережі та інші платформи, з'являється більше можливостей для візуалізації контенту.

Сьогодні все частіше на поверхню спливає головний мінус Web 2.0 – надмірна централізація. Незважаючи на стрімкий розвиток користувацького контенту, насправді ним володіють Facebook, Google та інші корпорації.

У результаті, користувачі стикаються з цензурою, передачею персональних даних третім особам і нав'язливим таргетингом, витоками інформації і дублюванням контенту.

У зв'язку з цим виникає потреба в розподіленій системі, яка вирішила б вищеназвані проблеми, тобто в Web 3.0. На цій стадії користувачі повинні стати повноцінними власниками власного контенту, отримати можливість його монетизувати і обмінюватися інформацією за допомогою децентралізованих сервісів (рисунок 1).

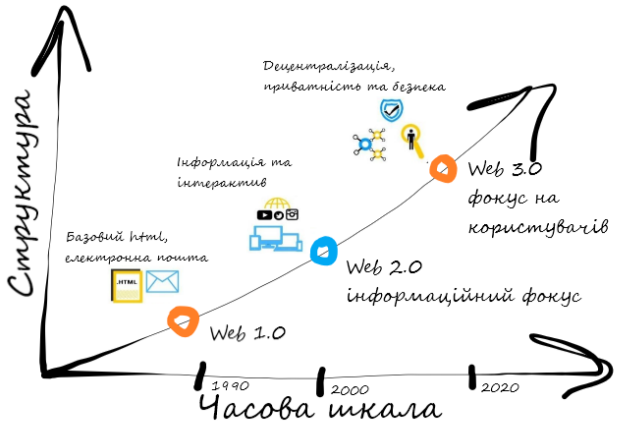


Рис. 1. Етапи розвитку інтернету

Web 3.0 – Це версія Інтернету для користувачів, який управляється спільнотою таких же користувачів, – доповнює Ілля Максименко, CEO Plasma. Finance. – Удосконалена аналітика, персональний підхід до користувача, поліпшена графіка і UX з'єднуються з концепціями управління особистою інформацією і p2p фінансової взаємодії між учасниками мережі безпосередньо, без посередників» [6].

Постановка завдання. Мета цієї статті полягає у визначенні ключових аспектів застосування концептуальної моделі Web 3.0 у спеціалізованих сценаріях, забезпечуючи гармонійне поєднання між децентралізованими структурами та потребами предметних областей. Зокрема, акцент робиться на адаптації смарт-контрактів та токенізованих систем, що здатні підтримувати надійний і безпечний обмін даними. Використання смарт-контрактів у Web 3.0 інфраструктурі допомагає автоматизувати процеси, підвищити їхню прозорість та безпеку, зменшуючи залежність від центральних організацій і підвищуючи рівень довіри між учасниками взаємодії.

Виклад основного матеріалу.

Розробка концептуальної моделі для представлення інфраструктури Web 3.0 з акцентом на предметно-орієнтовані сценарії. У сучасному світі інфраструктури Web 3.0 стають основою для створення розподілених додатків (dApps), що забезпечують безпечний, прозорий і ефективний обмін даними. Ця концептуальна модель описує основні компоненти, що складають інфраструктуру Web 3.0, і взаємозв'язки між ними.

Основними елементами цієї моделі є системи управління даними, децентралізовані додатки та користувачі, які взаємодіють за допомогою смарт-контрактів. Блокчейн – це базова технологія, що забезпечує зберігання даних і виконання смарт-контрактів [7]. Користувацькі інтерфейси забезпечують взаємодію між користувачами і децентралізованими додатками, роблячи процеси простими і доступними.

UML-діаграма класів (рисунок 2) ілюструє ці зв'язки і показує, як користувачі можуть ефективно взаємодіяти з різними компонентами інфраструктури Web 3.0 у контексті предметно-орієнтованого сценарію.

На додаток до вже описаних компонентів, важливо зосередитися на ролі децентралізованих автономних організацій (DAO), які стають важливими учасниками інфраструктури Веб 3.0: ДАО не потребують централізованих посередників і дозволяють управляти та приймати рішення за допомогою смарт-контрактів. Це створює нові можливості для самоорганізації спільнот та ефективного управління ресурсами. У цьому контексті важливу роль відіграє також інтероперабельність між різними блокчейнами, тим самим забезпечує масштабованість і безперервність розподілених додатків у глобальних мережах Веб 3.0.

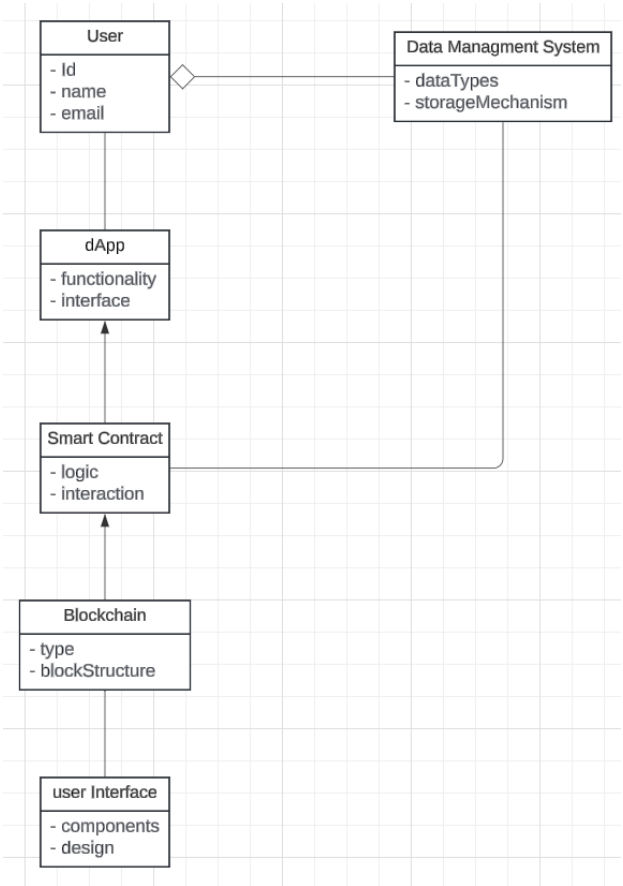


Рис. 2. UML-діаграма представлення концептуальної моделі інфраструктури Web 3.0 та предметно-орієнтованих сценаріїв

Зображена UML-діаграма показує взаємозв'язки між основними компонентами інфраструктури Web 3.0. Користувачі мають відносини агрегації з системою управління даними, яка може працювати з різними типами даних і механізмами зберігання. Користувачі також взаємодіють з розподіленими додатками (dApps), де

виконуються функціональні дії та тематично-орієнтовані сценарії.

Децентралізовані додатки мають відносини агрегації зі смарт-контрактами, що дозволяє dApps використовувати бізнес-логіку і функціональність смарт-контрактів для виконання транзакцій на блокчейні. Смарт-контракти взаємодіють безпосередньо з блокчейном, на якому вони виконуються і зберігаються, що забезпечує їх децентралізовану природу і безпеку [8].

Користувацький інтерфейс (User Interface) з'єднаний із dApp, оскільки саме через нього користувачі отримують доступ до функціональності застосунків, що відображає інформацію та дозволяє взаємодіяти з системою в рамках предметно-орієнтованих сценаріїв.

Web 3.0 – це захоплююча розробка, яка може революціонізувати спосіб взаємодії з інтернетом (рисунок 3). Завдяки децентралізації, блокчейну, децентралізованим додаткам, смарт-контрактам і інтернет речей, Web 3.0 обіцяє створити більш безпечну, прозору і демократичну мережу.

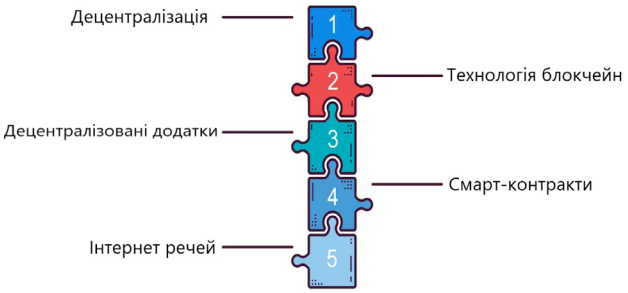


Рис. 3. Web 3.0: майбутнє децентралізованих додатків

Однак, найбільш підходящим форматом для візуалізації інфраструктури Web 3.0 під час обробки предметно-орієнтованого сценарію є діаграма послідовності. Цей формат дає змогу відобразити взаємодію між різними компонентами системи Web 3.0 і послідовність повідомлень, що передаються між компонентами в процесі обробки предметно-орієнтованого сценарію (рисунок 4).

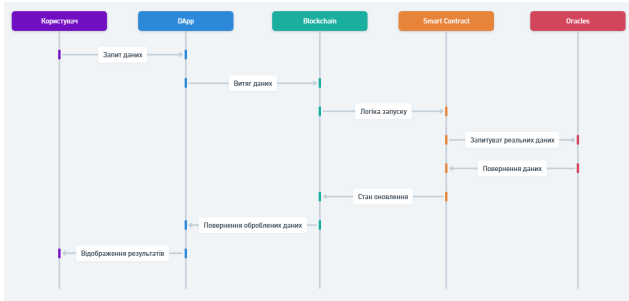


Рис. 4. Діаграма послідовності для візуалізації інфраструктури Web 3.0

Інфраструктура Web 3.0. У найзагальнішому сенсі інфраструктура Web 3.0 включає пристрої, блокчейн та всі інші рівні технологічного стеку блокчейнів. Однак, коли говориться про «інфраструктуру Web 3.0» , мається на увазі технології, інструменти та рішення, необхідні розробникам для створення та експлуатації dapps. Варто відзначити, що термінологія і класифікація блокчейна ще не уніфіковані. Тут часто можуть використовуватися різні терміни, що стосуються одних і тих самих аспектів. Але є команди, компанії та організації, які докладають зусиль для забезпечення більш високого рівня ясності, і «Стандарт класифікації цифрових активів» CoinDesk (DACS) є такою ініціативою [9]. Таким чином, DACS рухається вперед. Зрештою, це може допомогти зрозуміти складність інфраструктури Web 3.0 (рисунок 5).

Дивлячись на зображення вище, можна побачити, що DACS в даний час визначає шість секторів Web 3.0: обчислювальна техніка, валюта, DeFi, культура та розваги, платформи смарт-контрактів та цифровізація. Серед цих секторів обчислювальна техніка та платформи смарт-контрактів в основному представляють інфраструктуру Web 3.0. Звичайно, межі можуть бути розмитими, а інші сектори також можуть бути залучені до деяких конкретних аспектів інфраструктури Web 3.0.

Більш того, платформи смарт-контрактів є основою інфраструктури Web 3.0. Як розробник dapp, вам не потрібно безпосередньо працювати з цим рівнем.

Сценарії роботи з цифровими активами (NFT), розумними контрактами, децентралізованими автономними організаціями (DAO) та іншими. DAO, смарт-контракти та NFT обіцяють прозорість, однак важливо розрізняти фактичну прозорість та технічну. Бачити код – це одне, але вміти читати і розуміти його нюанси і можливості – зовсім інше. Можна стверджувати, що лише досвідчені розробники можуть претендувати на повне розуміння коду та його функціональних можливостей, отже, для неспеціалістів розуміння коду може бути складним завданням. Однак Технічна прозорість забезпечує більший ступінь розуміння, ніж відсутність прозорості, і забезпечує унікальний рівень відкритості та підзвітності, який не завжди притаманний більш традиційним організаціям чи компаніям.

NFT може бути описаний як цифровий сертифікат на блокчейні, що асоціює користувача із зображенням, кожне з яких відрізняється від іншого своїми метаданими і унікальними ідентифікаторами,

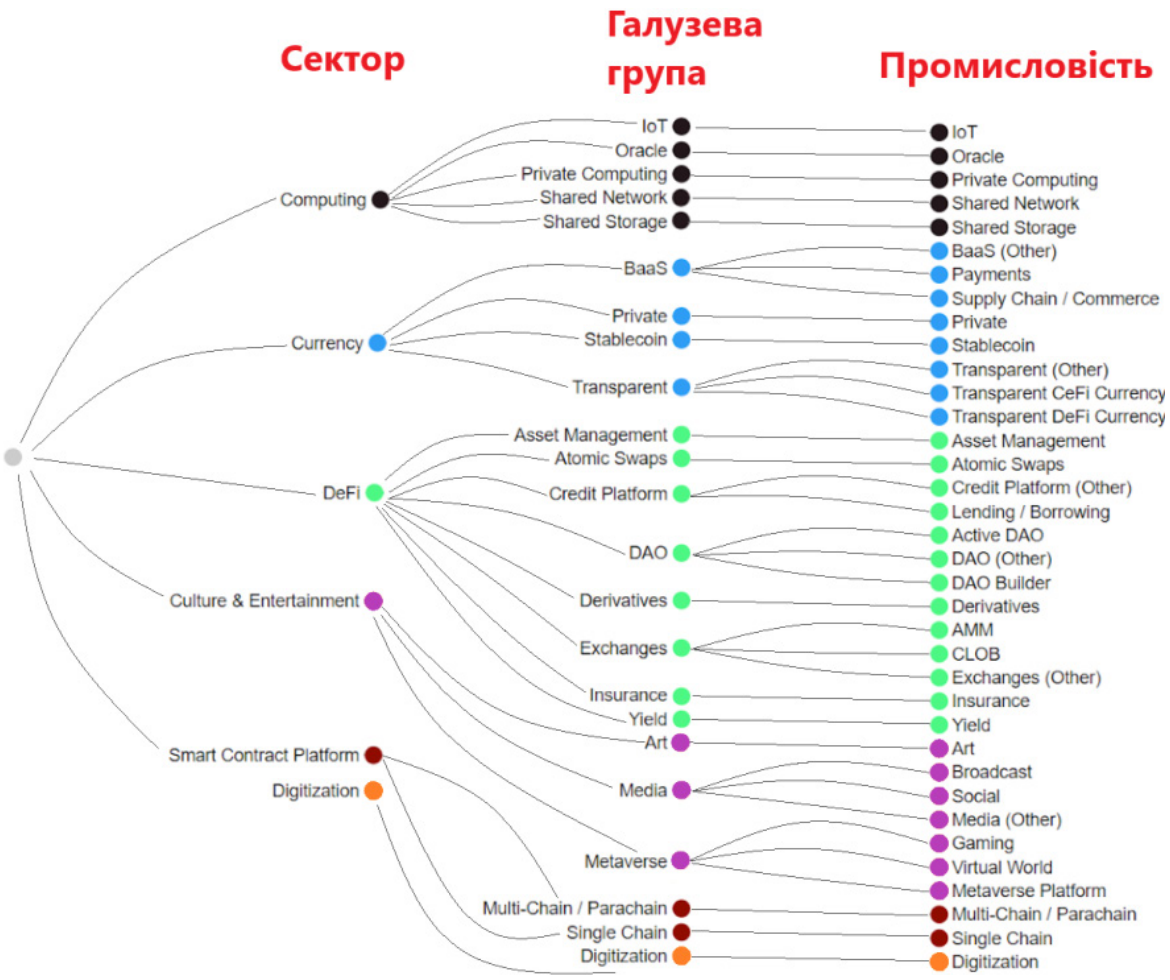


Рис. 5. Інфраструктура Web 3.0

отже, кожне NFT відрізняється від іншого [10]. Гейтон і Мюррей описують фундаментальну різницю між токенами та NFT, які, хоча іноді використовуються взаємозамінно, є взаємозамінними, тоді як NFT є унікальними та не взаємозамінними. Що стосується DAO, унікальність NFTs полягає в тому, що її можна використовувати для голосування в одному DAO, але не в іншому [11].

Нік Сабо, батько смарт-контрактів, описує їх як «комп'ютеризовані протоколи транзакцій, які виконують умови контракту», які працюють в прискореному режимі для перевірки або виконання цифрових переговорів і забезпечення одноранговых транзакцій між окремими особами [10]. Розумні контракти «підвищують безпеку, прозорість та зменшують здатність окремих осіб або невеликих груп порушувати політику чи правила за допомогою автоматизації...(отже, вони) дозволяють DAP автоматизувати дії хоста, коли виконуються певні умови» [12].

Розумні контракти та NFT є основоположними в операціях DAO, оскільки жетони можуть бути у формі NFT, які можуть бути доставлені за допомогою розумних контрактів із самого DAO або будь-якого іншого дозволеного пункту. NFT мають безліч застосувань в рамках DAO, починаючи від використання в якості валюти, токенів для голосування і так далі. Смарт-контракти і NFT забезпечують прозорість, безпеку і ефективність в рамках DAO.

Ще більше суперечностей виникає, коли справа доходить до визначення DAO, однак кожне визначення надає різний відтінок тому, що таке DAO.

У чистому вигляді DAO – це організація, а значить, група людей із загальним мисленням або метою. Вони автономні, що означає, що організація використовує автоматизовані засоби, такі як смарт-контракти, і, отже, працює на блокчейні за допомогою смарт-контрактів, забезпечуючи прозорість і довіру без необхідності довіряти третій стороні. DAO децентралізовані, отже, немає централізованого органу, що приймає рішення, отже, невдача одного учасника не призведе до краху організації [13], на відміну від того, що відбува-

ється з компаніями в разі невдачі їх директора. Однак ця досконала теорія, безумовно, далека від практичної реальності з ряду причин, які будуть описані нижче. За словами Мюррея та ін.

DAO – це організації, «повністю керовані протоколами, які кодуються та застосовуються за допомогою розумних контрактів, а не людей». Вони продовжують стверджувати, що DAO «створюють можливості для людей швидко та безпечно організовуватися, збирати кошти та керувати собою, зберігаючи анонімність або використовуючи псевдоніми» [12].

Джек дю Роуз (2016) дає додаткове визначення DAO, описуючи це як «тип децентралізованого додатка, який стимулює своїх користувачів брати участь у діяльності, що сприяє досягненню узгоджених бізнес-цілей, дозволяючи їм працювати спільно, не вимагаючи від них довіри один до одного» [13].

Чохан зосереджується на більш технологічній стороні The DAO, тому описує її як «організацію, яка є запускається за допомогою правил, закодованих у вигляді комп'ютерних програм, які називаються смарт-контрактами», керованих «заздалегідь запрограмованими алгоритмами, які виконуються комп'ютерами на основі коду» [14].

Подібний підхід застосовують Де Філіппі та Райт, які описують DAO як «особливий вид децентралізованої організації, яка не управляється і не контролюється будь-якою особою, а повністю підпорядковується кодексу. На відміну від інших децентралізованих організацій, якими керують окремі особи, що володіють винятковими повноваженнями щодо прийняття рішень, DAO спроектовані так, щоб працювати автономно на блокчейні» [15]. Вони підкреслюють, що діяльність DAO визначається протоколом блокчейна, а смарт-контракти диктують, як організація приймає рішення і яким чином вони виконуються. як даоси взаємодіють із зовнішнім світом. Вони продовжують стверджувати, що природа блокчейн-мережі додатково гарантує, що всі кодифіковані положення будуть виконуватися відповідно до плану [15].

Ентузіасти DAO визначають DAO як «динамічний набір робочих відносин, які постійно та динамічно самоорганізовуються навколо проектів та результатів», створюючи середовище, в якому учасники отримують стимул брати участь у діяльності без вимоги довіри. Оскільки вони припускають, що члени кооперативу повинні сприяти громаді, «метою бізнесу є здійснення економічної діяльності на користь його працівників-членів, а не отримання прибутку для самого кооперативу або зовнішніх інвесторів» [13].

На думку цього автора, DAO може можна визначити як організацію, засновану на блокчейні, яка працює з використанням смарт-контрактів. Автономія та децентралізація організації залежать від уподобань її членів та засновників і можуть бути вигідними як некомерційній, так і прибутковій організації. Отже, хоча в ідеалі DAO є децентралізованою та автономною організацією, у практичних сценаріях існує спектр, який варіюється від повної централізації до повної децентралізації, і організація позиціонуватиме себе в цьому спектрі на основі своїх уподобань та вимог. Це, в свою чергу, буде визначати рівень роз'єднаності і тип організації, відповідний конкретної місії даної організації.

Висновки. Таким чином, у цій статті було висвітлено концептуальну модель, що представляє інфраструктуру Web 3.0, здатну ефективно обробляти проблемно-орієнтовані сценарії з використанням децентралізованих технологій, таких як блокчейн, смарт-контракти і технології розподілених актів (DAO). Модель показує, як ці технології можуть бути інтегровані для забезпечення високої безпеки, прозорості та автономії користувачів у різних додатках; використання UML-діаграм дозволяє чітко візуалізувати структуру та взаємодію компонентів системи, їх роботу та цілі. Взаємодія зі сценарієм стає більш зрозумілою. Запропоноване рішення сприяє подальшому розвитку та впровадженню Web 3.0 в різних секторах, включаючи управління даними, фінансові технології та цифрові активи. Майбутні дослідження спрямовані на розширення моделі для підтримки нових сценаріїв і подальшу оптимізацію її компонентів у відповідь на технологічні зміни і зростаючий попит на децентралізовані системи.

Список літератури:

1. Web 1.0, web 2.0 і web 3.0 – в чому відмінності та історія створення. [Електронний ресурс]. Режим доступу URL: https://cases.media/en/article/web-1-0-web-2-0-i-web-3-0-v-chomu-vidminnosti-ta-istoriya-stvorennya

2. Web 3.0 та блокчейн змінюють інтернет і бізнес. Пояснюємо, як саме. [Електронний ресурс]. Режим доступу URL: https://hub.kyivstar.ua/articles/web-3-0-ta-blokchejn-zminyuyut-internet-i-biznes-poyasnyuyemo-yak-same

3. Кросмедіа: контент, технології, перспективи: колективна моногр. / за заг. ред. д. н. із соц. ком. В. Е. Шевченко; Інститут журналістики Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К.:

Кафедра мультимедійних технологій і медіадизайну Інституту журналістики Київського національного університету імені Тараса Шевченка, 2017. – 234 с.

4. What is Web 3.0 (Web3)? Definition, guide and history. [Електронний ресурс]. Режим доступу URL:https://www.techtarget.com/whatis/definition/Web-30

5. Посібник з Web3-маркетингу: що потрібно знати, щоб бути попереду. [Електронний ресурс]. Режим доступу URL: https://drukarnia.com.ua/articles/posibnik-z-web3-marketingu-sho-potribno-znati-shob-buti-poperedu-k8JfZ

6. Plasma Finance. Your Web3 Dashboard for All Things DeFi and NFT. [Електронний ресурс]. Режим доступу URL: https://plasma.finance/

7. Що таке смарт-контракти в блокчейні та як вони працюють? [Електронний ресурс]. Режим доступу URL: https://learn.bybit.com/uk/blockchain/what-are-smart-contracts-in-blockchain-how-do-they-work/

8. Розумні контракти: їх роль і функціонування в блокчейні. [Електронний ресурс]. Режим доступу URL: https://plisio.net/uk/blog/smart-contracts-their-role-and-operation-in-blockchain

9. Digital asset classification standard. [Електронний ресурс]. Режим доступу URL: https://www.coindesk.com/tag/digital-asset-classification-standard/

10. Shilina, S. A comprehensive study on Non-fungible tokens (NFTs): Use cases, ecosystems, benefits and challenges. Journal of Innovation & Knowledge, 2021. 6(3), 114-121.

11. Gayton, C., & Murray, A.. DAOs, NFTs, Web 3.0, and the metaverse: What does it all mean? KM World, 2022, May 31, 3-3,5.

12. Murray, A., Kim, D., & Combs, J.. The promise of a decentralized internet: What is Web 3.0 and how can firms prepare? Business Horizons, 2023, 66(2), 191-202.

13. Tse, N. DAOs and the corporate form. Stanford Journal of Blockchain Law & Policy, 4(1) 2021, 24-44.

14. Chohan, U. W. The Decentralized Autonomous Organization And Governance Issues 2017, December (University Of New South Wales, Discussion Paper).

15. Du Rose, J. Clearmatics, Ethercasts & Colony 2016, May 4[Speech to the London Ethereum Monthly Meetup].

Patsora A.A. THE CONCEPTUAL MODEL OF REPRESENTING WEB 3.0 INFRASTRUCTURE IN THE PROCESSING OF A SUBJECT

The article is dedicated to developing a conceptual model of Web 3.0 infrastructure aimed at supporting domain-oriented scenarios in fields such as the Internet of Things (IoT), decentralized finance, digital asset management, smart contracts, and other use cases that require flexibility and adaptability. The primary focus is on creating a Web 3.0 architecture that, through decentralized principles, enables optimized data processing, enhances security levels, and integrates specific requirements for each domain. The conceptual Web 3.0 model includes a decentralized infrastructure based on interactions between independent nodes that communicate through secure protocols and smart contracts. This approach ensures system resilience to failures and avoids the need for a single centralized management point, increasing reliability and reducing vulnerability to attacks. The resource tokenization integrated into this architecture allows for defining access rights, tracking ownership changes, and facilitating the exchange of digital assets, which is especially useful for distributed financial applications and digital asset management systems. The use of smart contracts in this model significantly simplifies the implementation of complex data processing logic, such as the automated execution of conditional transactions between system participants, and creates opportunities for process automation across various industries. This allows Web 3.0 not only to process data but also to ensure transparency in operations while preserving information confidentiality and security. Thanks to the use of smart contracts within the Web 3.0 infrastructure, it is possible to create automated interaction systems that adapt to the needs of a specific domain, facilitating integration with existing systems and ensuring compatibility with other decentralized platforms.

To visualize this conceptual model, UML diagrams are applied, allowing the creation of a clear and flexible structure for the Web 3.0 system. UML provides developers and architects with the ability to clearly see the components, including decentralized nodes, data storage, security elements, and access control mechanisms. Furthermore, UML diagrams demonstrate the connections between components, enabling not only a better understanding of their interactions but also the identification of optimization opportunities. This visual approach simplifies the planning and implementation of an adaptive Web 3.0 architecture that meets the needs of specific domain scenarios and provides clear tools for integration with other services and platforms. The Web 3.0 infrastructure also incorporates access control mechanisms that ensure a high level of data protection in a decentralized environment. The distribution of authority and the maintenance of confidentiality become key aspects, as users retain full control over their data, and Web 3.0 mechanisms prevent unauthorized access. This is particularly relevant for scenarios where personal or financial data require protection and for ecosystems where interaction occurs among a large number of participants with varying levels of access.

Key words: *Web 3, Conceptual model, Domain-specific scenarios, UML diagrams, Data security, Smart contracts, Tokenization, Decentralized applications (DApps), Internet of Things (IoT), Interoperability.*

УДК 007.52
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/24

Платов І.М.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Павловська Ю.О.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ КРОКУЮЧОГО ГЕКСАПОДА ВІД ТРАЄКТОРІЇ РУХУ КІНЦІВОК В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Стаття присвячена вдосконаленню системи керування рухом крокуючого робота гексапода за рахунок оптимізації споживання енергії при різних рухах кінцівок.

Високомобільні крокуючі роботи можуть рухатись як в горизонтальній площині так і в вертикальній, з врахуванням того, що алгоритмічно такі рухи суттєво не відрізняються, крім ступеня навантаженості серводвигунів і їхнього енергоспоживання, тому в статті розглядається споживання серводвигунів саме при вертикальному русі гексапода як найбільш екстремального режиму роботи.

На основі проведеного аналізу зроблено висновок, що для практичного впровадження запропонованих методик і алгоритмів потрібен комплексний підхід, який забезпечить створення адаптивного та енергоефективного алгоритму управління рухом гексапода в умовах невизначеності.

Для розробки такого алгоритму керування було створено математичну модель, яка враховує особливості вертикального руху гексапода, проведено моделювання та розрахунок енерговитрат при різних траєкторіях руху кінцівок та різних режимах ходи. Досліджено енергоефективність для найбільш поширених типів ходи гексаподів: трипедальної, біпедальної та хвильової. При цьому запропоновано використовувати дві моделі генерації траєкторій руху кінцівки для кращої адаптивності та універсалізації алгоритму керування: дуга еліпса та циклоїда. У відповідності до отриманих результатів моделювання в середовищі MATLAB було встановлено, що максимальну енергоефективність при вертикальному підйомі гексапода має трипедальна хода, однак вона найменш стійка для вертикального руху за рахунок сил тертя кінцівок та поверхні. Натомість хвильова хода має найбільше енергоспоживання та найменшу швидкість, проте є більш стійкою. Біпедальна хода має оптимальне відношення енергоспоживання до стійкості.

Запропоновано та обґрунтовано використання модифікованого алгоритму керування рухом кінцівок з перемиканням типу траєкторії та ходи, залежно від зміни умов навколишнього середовища для підвищення енергоефективності системи вцілому.

Ключові слова: *моделювання, енергоспоживання, хода, траєкторія, робот, гексапод, кінематика, кінцівка, невизначені умови, MATLAB.*

Постановка проблеми. Крокуючі роботи, на відміну від колісних або гусеничних машин, мають кращу прохідність та маневреність на нерівних поверхнях за рахунок більшого кліренсу [1]. Шестиногі крокуючі роботи (гексаподи) є найбільш оптимальним конструктивним рішенням, яке зберігає баланс між енергоспоживанням та стійкістю, порівняно з октоподами, або квадроподами. Також гексаподи мають досить велику кількість потенційних варіацій ходи, що дає можливість реалізувати широкий діапазон керування. Але незважаючи на ці переваги, крокуючі роботи мають суттєво більше енергоспоживання, порівняно з колісними/гусеничними роботами.

Зазвичай в колісному транспорті застосовують один (або декілька, у випадку, коли двигун безпосередньо зв'язаний з колесом) двигун на вісь та механічну систему передачі обертового моменту до коліс [2]. Крокуючі роботи мають по декілька двигунів на кінцівку, при цьому для реалізації ходи треба щонайменше дві ступені свободи, тому сумарно гексапод має містити як мінімум 12 двигунів, відповідно його маса та габарити значно збільшуються [3]. Проте, при такій кількості ступенів свободи гексапод стає менш мобільним, втрачається можливість виконувати складні рухи та зменшується швидкість пересування, тому рекомендована кількість ступенів свободи на кін-

цівку – три, що відповідає 18 серводвигунам на конструкцію. Варто зауважити, що чим більше ступенів свободи реалізовано для кожної кінцівки, тим більший діапазон керування та ступінь адаптивності, але це збільшує кількість двигунів (масу конструкції) і енергоспоживання, відповідно.

Автономний рух крокуючих роботів – це досить складна задача, яка вимагає ретельних досліджень та налаштувань, перш ніж роботів можна буде використовувати для вирішення реальних задач. Головною задачею є керування кінцівками, оскільки вони є рушіями платформи, на якій може бути розташоване корисне навантаження або робочій інструмент. Тому для якісного функціонування гексапода в реальних умовах, необхідні різноманітні методи керування ходою, з урахуванням енергоефективності.

Наразі існують роботи, присвячені дослідженню енергоспоживання для різних типів ходи та для різних умов застосування гексаподів. Проте ці дослідження спрямовані, перш за все, на ходу в горизонтальній площині або по нерівній поверхні [4–7]. Слід зазначити, що алгоритмічно рух в горизонтальній чи вертикальній площині підпорядкований одним і тим самим принципам, проте підйом вгору напряму пов'язаний із збільшенням навантаження на елементи конструкції і відповідно збільшенням споживання енергії. Тому далі в статті буде розглядатись саме вертикальний рух робота в режимі підйому, хоча всі запропоновані алгоритми будуть актуальні і для руху в горизонтальній площині.

Останні розробки показали, що можливо реалізувати підйом робота між двома стінами та його утримання за рахунок сил тертя між кінцівками та поверхнею [8]. Це перспективний та недостатньо досліджений напрямок, котрий значно розширює спектр задач, що може вирішувати робот.

Тому дана робота буде присвячена питанню підвищення енергоефективності крокуючих гексаподів при різних типах ходи і видах рухів кінцівок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема енергоефективності завжди обмежувала широке застосування крокуючих роботів, тому дослідники даного аспекту намагались оптимізувати енергоспоживання без переробки системи живлення, базуючись на аналізі параметрів та типів ходи. В результаті даному питанню було присвячено багато робіт, з яких можна виділити [4], де були проведені експерименти з різними типами ходи та швидкостями з навантаженнями 1.16 та 2.9 кг. Енергоефективність ходи підбиралася за діаграмою енергоспоживання, також був розроблений алгоритм руху для мінімізації енергоспоживання. Результати досліджень показали, що пульсуюча (ripple) та тетрапедальна (tetrapod) типи ходи не є енергоефективними. Дослідники акцентують увагу, що варто застосовувати хвильову ходу для малих швидкостей, та трипедальну для більших швидкостей. Використовуючи алгоритм перемикання типу ходи під час руху, вдалося знизити енергоспоживання на приблизно 7.7–21%.

В роботі [5] розглядається вплив висоти підйому кінцівки та вплив висоти платформи на енергоспоживання. Використовувались трипедальна, тетрапедальна та хвильова типи ходи. Для експериментів було обрано п'ять різних значень висоти платформи та підйому кінцівки. Споживання енергії розраховувались для переміщення на відстань 10м. Результати показали, що енергоспоживання не залежить від висоти платформи або ходи, але залежить від висоти підйому кінцівки. Автори стверджують, що найменш ефективною ходою є хвильова, а найефективнішою є трипедальна, обґрунтовуючи це тим, що при хвильовій ході приводи мають найбільшу швидкість, а при трипедальній – найменшу.

Автори в статті [7] провели дослідження енергоефективності для трипедальної ходи по горизонтальній поверхні з перешкодами. Траєкторія кінцівки була сформована як половина дуги синусоїди. Оцінка енергоспоживання проводилася при різних значеннях висоти та довжини кроку кінцівки. Запропонований метод заснований на зміні конфігурації траєкторії руху кінцівки для оминання перешкод на місцевостях різної складності. Експериментальні дослідження показали, що запропонована методика дозволяє знизити середнє енергоспоживання більш ніж на 17%.

Постановка завдання. Аналіз останніх досліджень і відповідних публікацій показав актуальність проблеми оптимізації енергоспоживання крокуючих роботів у різних умовах їх функціонування. Проте, водночас, відсутні дослідження енергоспоживання гексаподів при підйомі та утриманні між двома стінами за рахунок сил тертя кінцівок і поверхні.

Тому метою статті є необхідність вдосконалення та адаптації існуючих систем керування гексаподом, які забезпечать максимальну енергоефективність і час функціонування, при використанні різні типи ходи під час вертикального руху як найбільш екстремального режиму роботи.

Виклад основного матеріалу. За основу розрахунку споживання енергії візьмемо попередньо

розроблену в [9] кінематичну схему для однієї кінцівки, загальна схема розташування серводвигунів на прямокутному корпусі та спрощена кінематика наведена на рисунку 1, де $L_{1\text{-}3}$ – довжини ланок; $J_{1\text{-}3}$ – суглоби; $L_{I\text{-}III}$ – номери кінцівок з лівої сторони платформи, $R_{I\text{-}III}$ – номери кінцівок з правої сторони платформи, $S_{I\text{-}III}$ – номери серводвигунів.

Оскільки кінцівки розташовані симетрично та мають однакові параметри, для спрощення подальших обрахунків надалі будемо наводити вирази лише для однієї кінцівки. Згідно наведеної кінематичної схеми, координати стопи матимуть вигляд (1):

$$\begin{aligned} x &= -\cos(\alpha) * \left(l1 + l3 * \cos(\beta+\gamma) + l2 * \cos(\beta)\right) \\ y &= \sin(\alpha) * \left(l1 + l3 * \cos(\beta+\gamma) + l2 * \cos(\beta)\right) \\ z &= -l3 * \sin(\beta+\gamma) - l2 * \sin(\beta) \end{aligned} \quad (1)$$

де α,β,γ – кути повороту суглобів $J_{1\text{-}3}$; $l1\text{-}3$ – довжини ланок кінцівки.

Рівняння (1) вирішують пряму задачу кінематики. Для вирішення зворотної задачі був застосований ітераційний метод Ньютона-Рафсона [10]. При застосуванні ітераційного підходу обрахунки потребують більшу кількість обчислень тригонометричних функцій, порівняно з геометричним методом, що може бути критичним для деяких малопотужних обчислювальних ядер. Але при цьому модифікація конструкції не впливає на збережається можливість легкої адаптації, оскільки даний метод не має прив'язки до конкретної кінематичної схеми, на відміну від геометричного підходу, який пропонується в роботі [11], тобто достатньо отримати вирази для прямої задачі кінематики будь-яким методом [12].

Метод Ньютона-Рафсона є розширенням метода Ньютона для багатовимірних нелінійних рівнянь (2):

$$x^{k+1} = x^k - J\left(x^k\right)^{-1} F\left(x^k\right) \quad (2)$$

де $F\left(x^k\right)$ – вектор рівнянь координат (1); $J\left(x^k\right)$ – Якобіан.

Якобіан $J\left(x^k\right)$ для (1) матиме вигляд (3):

$$J\left(x^k\right) = \begin{bmatrix} \frac{\partial F1}{\partial\alpha} & \frac{\partial F1}{\partial\beta} & \frac{\partial F1}{\partial\gamma} \\ \frac{\partial F2}{\partial\alpha} & \frac{\partial F2}{\partial\beta} & \frac{\partial F2}{\partial\gamma} \\ \frac{\partial F3}{\partial\alpha} & \frac{\partial F3}{\partial\beta} & \frac{\partial F3}{\partial\gamma} \end{bmatrix} \quad (3)$$

де $F1-3$ – це x,y,z з виразу (1).

Умовою завершення роботи ітераційного методу є досягнення певного порогу похибки, яка визначається як $\varepsilon = x^k - x^{k+1}$.

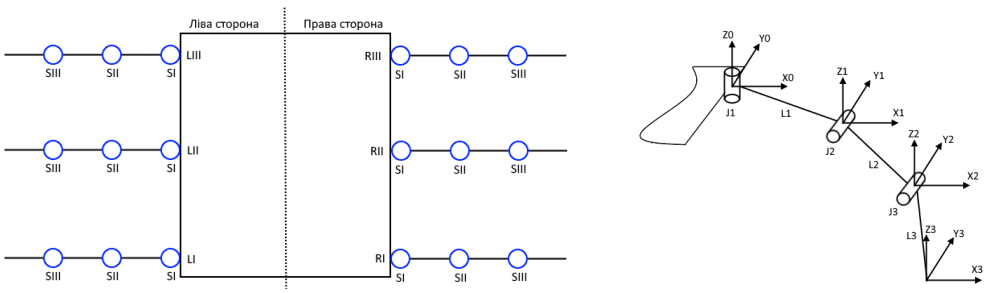
В результаті, підставивши вирази (1) в (3) та (2), отримаємо кути, на які потрібно повертати суглоби для переносу кінцівки в нові бажані положення. Ці положення визначаються траєкторією руху кінцівки. Для побудови траєкторії зазвичай застосовують циклічні функції або поліноми, оскільки хода гексапода в загальному випадку є шаблонною [13, 14].

Для генерації траєкторії використаємо прості функції, а саме циклоїду та дугу еліпса. Циклоїда визначається параметрично рівняннями (4):

$$\begin{aligned} x &= rt - r\sin(t) \\ y &= r - r\cos(t) \end{aligned} \quad (4)$$

Дана функція має період $2\pi r$, де r – радіус фіксованої точки кола. Тому її зручно використовувати для побудови траєкторії руху кінцівки, оскільки варіюючи лише одним параметром r можна змінювати як висоту підйому кінцівки, так і відстань переносу в нове положення. Довжина арки циклоїди дорівнює $8r$.

З іншого боку перевага генерації траєкторії циклоїдою є недоліком, оскільки не в усіх випадках потрібно масштабувати одразу довжину та висоту



а б

Рис. 1. а – умовне позначення кінцівок гексапода; б – системи координат суглобів кінцівки

дуги, особливо з урахуванням енергоспоживання. Тому іншим підходом є використання еліпса, параметричні рівняння якого мають вигляд (5):

$$x = \text{a}^*\cos(t)$$
$$y = b * sin(t) \quad (5)$$

В даному випадку для налаштування використовуються два параметри a, b – велика та мала піввісі. Параметр t лежить в межах $0 \le t \le 2\pi$. Для генерації траєкторії будемо використовувати дугу еліпса, яка знаходиться в межах двох квадрантів площини: $\frac{\pi}{2} \le t \le \frac{3\pi}{2}$. Довжина дуги еліпса визначається вирішенням інтегралу:

$$a\int_{t0}^{t2}\sqrt{1 - e^2\cos(t)^2}\ ,$$

де e – ексцентриситет.

Як було зазначено в роботах [15, 16], найбільш розповсюдженими типами ходи для гексаподів є: трипедальна, біпедальна та послідовна (або хвильова). В першому випадку три кінцівки знаходяться в стані переносу, а інші три знаходяться в контакті з поверхнею, рисунок 2. В другому випадку – дві в стані переносу, інші чотири в контакті з поверхнею, рисунок 3. В останньому випадку лише одна знаходиться в стані переносу, рисунок 4.

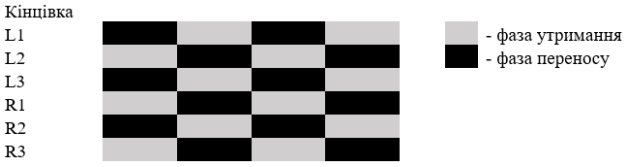


Рис. 2. Фази трипедальної ходи

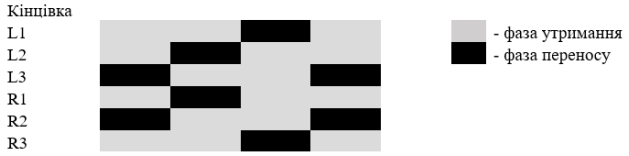


Рис. 3. Фази біпедальної ходи

На відміну від пересування по горизонтальній поверхні, вертикальний підйом потребує обрахунку сил, що діють на всі елементи конструкції. При цьому часто сили оцінюють як статично невизначені. Такий підхід доцільний, якщо вважати, що конструкція та поверхня не є абсолютно жорсткими, а деформаціями, які виникають внаслідок взаємодії кінцівки і поверхні (а також сили реакцій в суглобах), не можна знехтувати. В даному випадку ми розглядатимемо сили як статично визначені, оскільки серводвигуни які застосовувались для побудови макету не в змозі розвивати достатній момент, щоб істотно деформувати конструкцію робота, або поверхні, між якими встановлюється контакт, тобто між кінцівками та стінами.

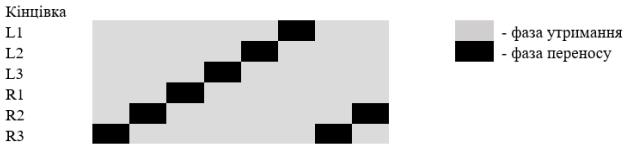


Рис. 4. Фази хвильової ходи

В попередній роботі [17] ми визначили сили, що діють на стіни та, відповідно, реакції у вигляді горизонтальної та вертикальної складової. Для руху кінцівок застосовувались серводвигуни MG995 з обертовим моментом 0.98 Н*м, швидкість обертання становить 5.2 рад/с, робоча номінальна напруга 6 В. Для оцінки енергоспоживання для різних траєкторій руху кінцівок були проведені заміри струму серводвигунів, з урахуванням визначених сил притискання, результати наведені в таблиці 1. При цьому варто зазначити, що при підйомі робота були задіяні лише $S_{II\text{-}III}$ серводвигуни, як позначено на рисунку 1 а, т. я. S_I обертають кінцівки в горизонтальній площині, тобто на них не діють моменти, що виникають внаслідок реакції опори (стін) – споживання цих приводів в режимі холостого ходу.

Таблиця 1

Струм споживання серводвигунів при вертикальному підйомі

№ Серводвигуна	Режим роботи	Струм споживання, А
S_I	Холостий хід	0.11
S_{II}	Фаза переносу/утримання	0.13/0.9
S_{III}	Фаза переносу/утримання	0.12/0.9

Різні значення струму для $S_{II\text{-}III}$ пояснюються різним навантаженням (довжини ланок) на приводи в стані переносу. Визначимо час різних фаз руху кінцівки. Для цього проведемо моделювання та побудуємо графіки траєкторій в середовищі MATLAB. Заначимо, що загальні габарити робота становлять 0.252х0.665 м (з повністю випрямленими кінцівками), маса конструкції без корисного навантаження становить 2.12 кг. Довжини ланок кінцівки: $l1 = l2 = 0.066$ м, $l3 = 0.113$ м. Початкові кути кожного суглоба $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 60^\circ$, $\gamma = 70^\circ$.

На рисунку 5 позначена циклоїдальна траєкторія та зміни кутів суглобів від початкового до нового положення, радіус $r = 0.01$ м.

При такій конфігурації кінцівка піднімається в гору приблизно на 2 см та переміщується на 6 і займає нове положення.

Для спрощення оцінки енергоспоживання, визначимо середнє значення модуля швидкості, яке для даного випадку становить 1.18 м/с. Таким чином порахувати час переносу від початкового до нового положення можна за формулою:

$$t1 = t0 + \frac{S}{V} \quad (6)$$

Довжина дуги циклоїди S = 0.08 м, вважатимемо, що t0 = 0 с, отже t1= 0.06 с. Відповідно, фаза переносу однієї кінцівки при циклоїдальній траєкторії руху становить 0.06 с.

Порахуємо час переносу для еліпсоїдальної траєкторії. На рисунку 7 позначена еліпсоїдальна тра-

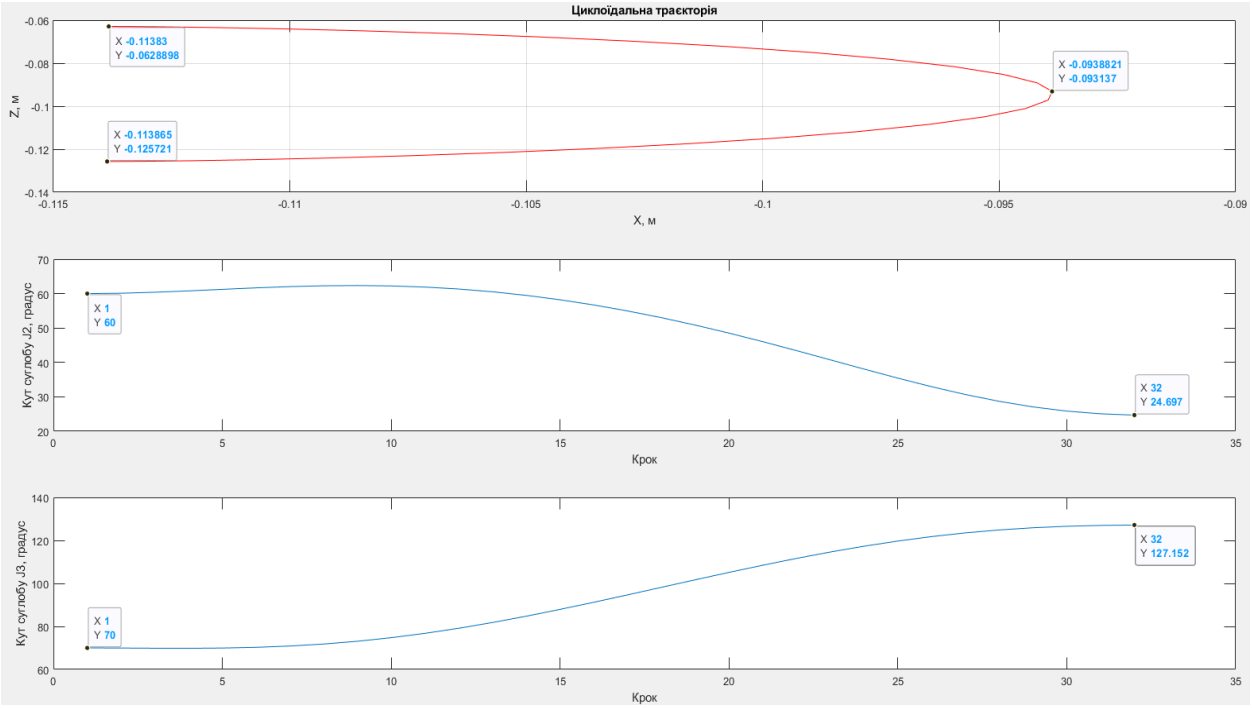


Рис. 5. Циклоїдальна траєкторія руху кінцівки

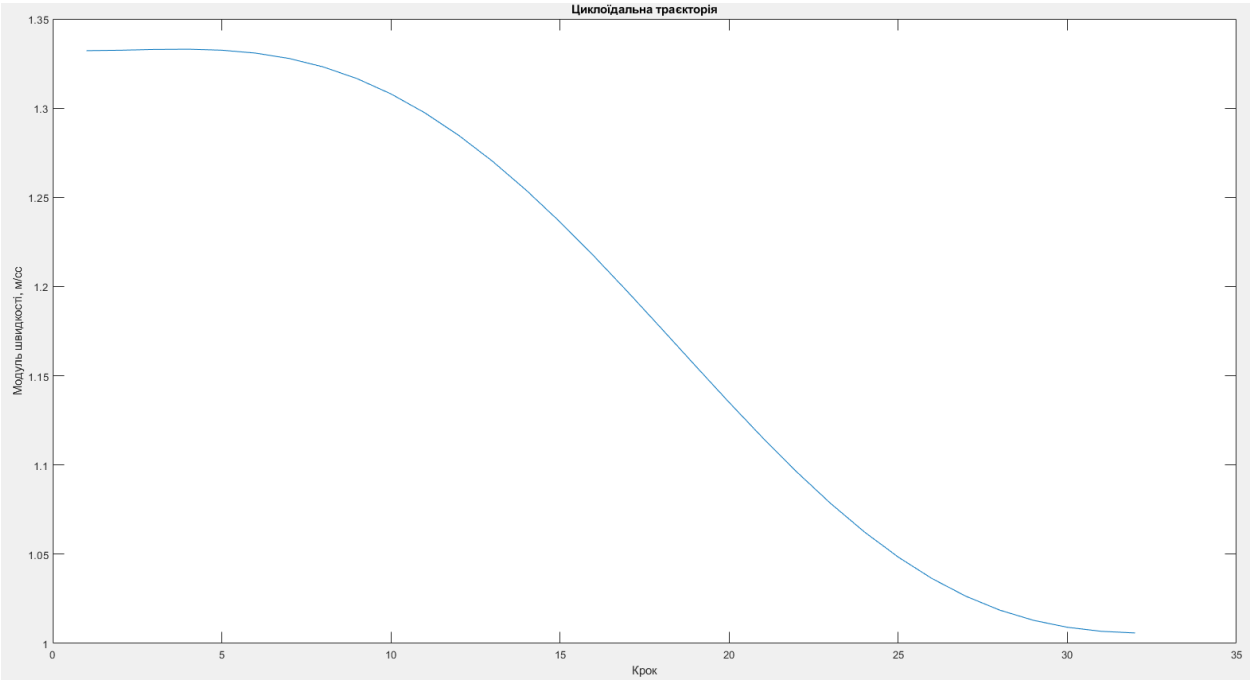


Рис. 6. Модуль швидкості кінцівки при циклоїдальній траєкторії руху

єкторія руху кінцівки та кути обертання суглобів. Значення великої та малої піввісі: $a = 0.05$; $b = 0.01$.

Графік модуля швидкості показано на рисунку 8. Даний варіант траєкторії дозволяє відривати кінцівку від поверхні приблизно на 5 см, і переносити її на 2 см вгору. Довжина дуги еліпса в даному випадку становить 0.105 м, а середнє значення модуля швидкості 1.4 м/с. Для розрахунку часу фази переносу також скористаємося формулою (6). В результаті отримаємо: t1 = 0.075 с.

Знаючи час фази переносу кінцівки, можна розраховувати енергоспоживання для трипедальної, біпедальної та хвильової ходи. Для цього скористаємося формулою обрахунку повної споживаної потужності (7).

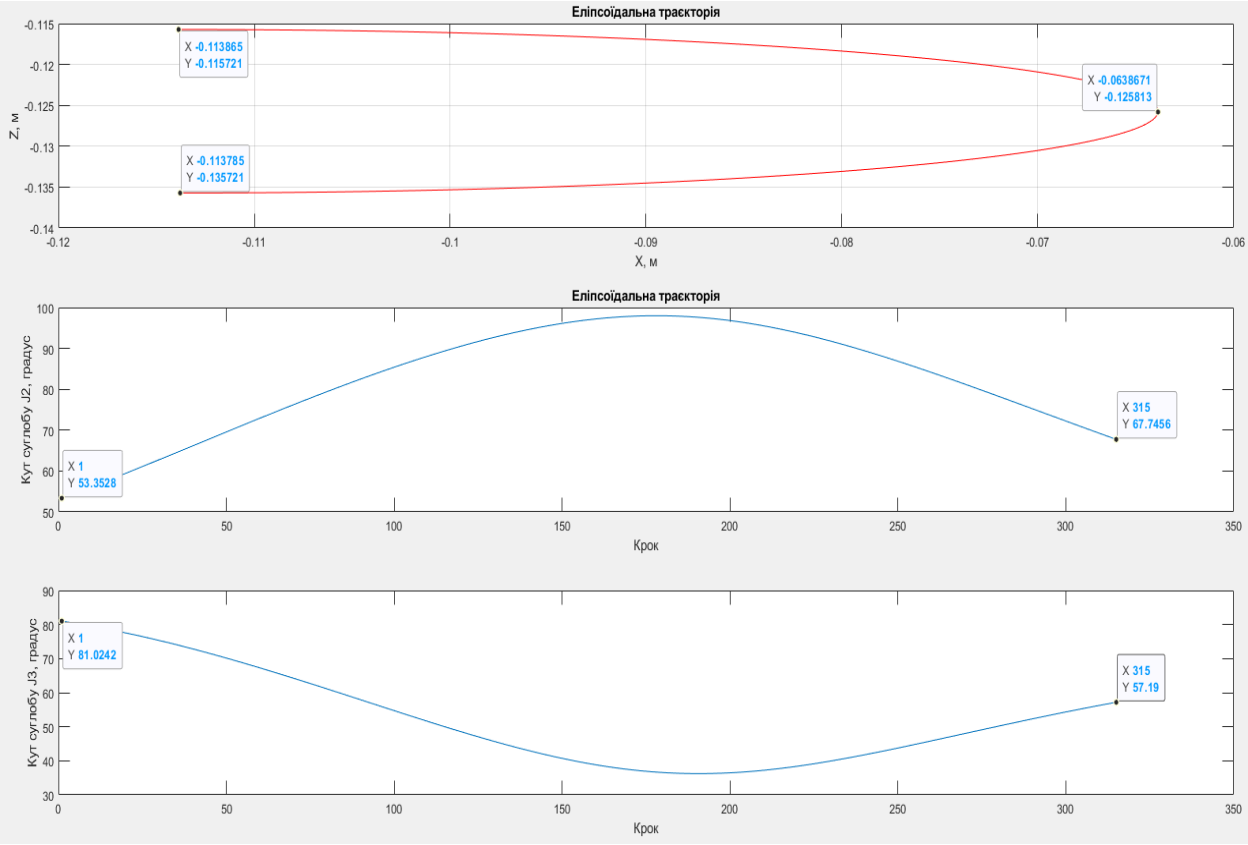


Рис. 7. Еліпсоїдальна траєкторія руху кінцівки

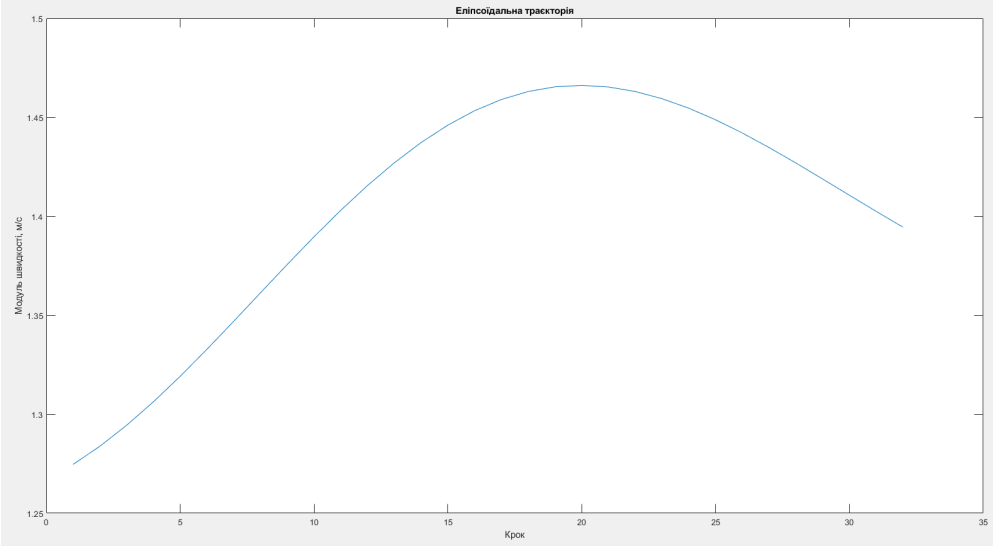


Рис. 8. Модуль швидкості кінцівки при еліпсоїдальній траєкторії руху

$$P = P_{ут} + P_{пер} \quad (7)$$

де $P_{ут}$ – потужність, споживана при утриманні кінцівки; $P_{пер}$ – потужність, споживана при переносі кінцівки.

Для трьох, зазначених раніше, типів ходи, з урахуванням значень струму з таблиці 1, розрахуємо споживану енергію для повного циклу підйому за формулою (8).

$$E = P * t \quad (8)$$

Результати наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Результати енергоспоживання для одного повного циклу ходи

E, Вт*год			
Траєкторія	**Хода**		
	Трипедальна	**Біпедальна**	**Хвильова**
Циклоїдальна	0.0061	0.0133	0.0497
Еліпсоїдальна	0.0076	0.016	0.062

Припустимо, що гексапод робить 10 кроків за хвилину хвильовою ходою з еліпсоїдальною траєкторією: 0.062*10 = 0.62 Вт*хв. З урахуванням ємності акумулятора, що становить 10 А*г та напрузі3.7Вотримаємоємність37Вт*год.Загодину роботи споживання буде 0.62 * 60 = 37.2 Вт*год, тобто час роботи від даного акумулятора із еліпсоїдальною траєкторією і хвильовою ходою за умови використання розробленої системи живлення, яка описана в роботі [17], становитиме приблизно 1 годину, для трипедальної ходи, час роботи збільшується до 8 годин.

Отримані результати свідчать про те, що найбільш енергоефективна хода – трипедальна, проте для вертикального підйому така хода має найменшу кількість точок опори, що може призвести до втрати стійкості і падіння робота, т. я. при такій ході лише одна кінцівка має контакт з поверхнею з одного боку платформи. Хвильова хода є найстійкішою, але, водночас самою енергоспоживчою, у відповідності до наведених в Таблиці 1 розрахунків – більш ніж у 8 разів. Біпедальна – є проміжною між трипедальною і пульсуючою за значення енергоефективності, надійності та швидкості.

При русі по горизонтальній поверхні, отримані значення в таблиці 1 слід враховувати з коефіцієнтом 0.6, т. я. навантаження на серводвигуни значно менше. Проте, для обрання типу ходи, або прийняття рішення про зміну алгоритму треба оперувати не лише даними про споживання системи і швидкість переміщення, а й про рельєф поверхні, тому після проведених розрахунків пропонується вдосконалити розроблену в роботі [18] систему керування за рахунок реалізації алгоритму перемикання ходи, залежно від стану навколишнього середовища. Блок схема алгоритму наведена на рисунку 9.

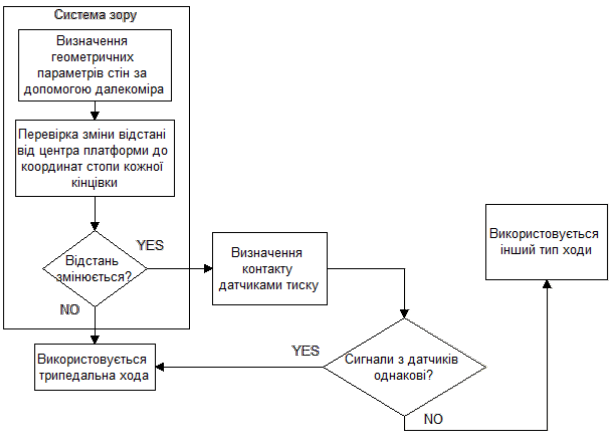


Рис. 9. Блок-схема алгоритму перемикання ходи, залежно від умов навколишнього простору

Розглянемо більш детально принцип роботи розробленого алгоритму. Датчик відстані (далекомір, лідар) вимірює відстань від координат центру платформи до координат стоп кінцівок та стін, визначених за допомогою (1). Якщо відстані незмінні, то приймається рішення про умовно рівний рельєф поверхні, тому застосовується найшвидший та найбільш енергоефективний варіант ходи – трипедальна. Якщо ж за даними далекоміра в околі координат стопи якоїсь з 6 кінцівок відбувається зміна відстані, і це підтверджується зміною показів датчиків тиску який розташований на стопі кінцівки (збільшення тиску відповідає виступаючій перешкоді, відсутність або зменшення – заглибині), то тип ходи перемикається на інший. При цьому, залежно від кількості визначених потенційно небезпечних точок, обирається або біпедальна, або хвильова хода. Кількість точок контакту у яких визначається відхилення від умовного профіля поверхні визначається експериментально в залежності від заданих початкових умов, або від інформації отриманих з інших датчиків.

Перемикання типу ходи при вертикальному підйомі гексапода може відбуватись не тільки за рахунок виявлення суттєвих нерівностей, а й при настанні позаштатної ситуації, наприклад при відмові серводвигуна або пошкодженні кінцівки [12] – алгоритм руху має бути змінений на більш стійкий, або при виході з ладу основного контура живлення (як запропоновано в [19]) при умові можливості живлення від додаткового слабко-

струмового контура, алгоритм руху слід змінити на найбільш енергоефективний, притому зменшити швидкість пересування.

Висновки. В даній роботі були проведені дослідження енергоефективності вертикального руху шестиногого крокуючого робота (гексапода). Для цього була розроблена математична модель та вирішені пряма та зворотна задачі кінематики. На базі цього був запропонований генератор траєкторії руху кінцівки як циклоїда та дуга еліпса. Таке рішення має певні переваги з точки зору адаптивності, оскільки дозволяє налаштовувати висоту та відставнь переносу кінцівки в залежності від наявності перешкод та форми рельєфу поверхні. Для цих траєкторій було оцінено енергоспоживання для трипедальної, біпедальної та хвильової ходи.

Моделювання в системі MATLAB із заданими параметрами показало, що у випадку циклоїдної форми траєкторії руху, кінцівка має найменший відрив від поверхні, проте досить значну відстань переносу, а для траєкторії, що описується дугою еліпса відрив більший, проте значно менша відстань переносу. Зазначимо, що такі розрахунки актуальні і для горизонтального руху, відповідно для руху по рівній поверхні з більшою швидкістю і для руху по поверхні із перешкодами.

За заміряним струмом споживання серводвигунів в різних режимах та проведеними розрахунками було встановлено, що найбільш енерговитратна та повільна хода – хвильова, проте вона має більше точок контакту із поверхнею, що для вертикального підйому є доволі важливим. Найшвидша хода з мінімальним енергоспоживанням – трипедальна, проте менша кількість точок контакту робить її придатною лише при рівних поверхнях. Різниця у енергоспоживанні при трипедальній і хвильовій ході перевищує 8 раз, що суттєво зменшує час автономної роботи гексапода. Параметри споживання енергії для біпедальної ходи є проміжними між трипедальною і хвильовою. Таким чином, був розроблений адаптивний алгоритм зміни режиму ходи в залежності від показів з датчиків (відстані та тиску), що здатен визначати параметри профілю поверхні і забезпечити оптимальний режим споживання енергії.

Перемикання типу ходи при вертикальному або горизонтальному русі гексапода може відбуватись не тільки за рахунок виявлення суттєвих нерівностей, а й при настанні позаштатної ситуації – при відмові серводвигуна, пошкодженні кінцівки або при виході з ладу основного контура живлення, якщо живлення відбувається від резервного слабкострумового джерела.

У подальшій роботі авторами буде проведено експериментальне підтвердження отриманих розрахункових значень енергоспоживання і ефективності системи керування в різних умовах на макетному зразку.

Список літератури:

1. Tedeschi F., Carbone G. Design Issues for Hexapod Walking Robots. *Robotics.* 2014. Vol. 3, no. 2. P. 181–206.

2. Song Z. et al. Design and analysis of a six-wheeled companion robot with mechanical obstacle-overcoming adaptivity. *Mechanical Sciences.* 2021. Vol. 12, no. 2. P. 1115–1136.

3. Платов І. М. Вдосконалення алгоритмів руху крокуючого робота-гексапода : магістерська дис. : 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. Київ, 2022. 102 с.

4. Luneckas M. et al. Hexapod Robot Gait Switching for Energy Consumption and Cost of Transport Management Using Heuristic Algorithms. *Applied Sciences.* 2021. Vol. 11, no. 3. P. 1-13.

5. Luneckas M. et al. Hexapod Robot Energy Consumption Dependence on Body Elevation and Step Height. *Elektronika ir Elektrotechnika*. 2014. Vol. 20, no. 7.

6. Wang G. et al. Minimizing the Energy Consumption for a Hexapod Robot Based on Optimal Force Distribution. *IEEE Access.* 2020. Vol. 8. P. 5393–5406.

7. Luneckas M. et al. Energy-efficient walking over irregular terrain: a case of hexapod robot. *Metrol. Meas. Syst.* 2019. Vol. 26No. 4, P. 645–660.

8. Shirai Y. et al. Risk-Aware Motion Planning for a Limbed Robot with Stochastic Gripping Forces Using Nonlinear Programming. *IEEE Robotics and Automation Letters.* 2020. Vol. 5, no. 4. P. 4994–5001.

9. Platov I. M., Pavlovskyi O. M. Justification for the control system for vertical movement of a small-sized walking robot. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* 2024. Том 35(74), №3. С. 187–194.

10. Newton-Raphson Method (Multivariate). *IIS Windows Server*. URL: https://pages.hmc.edu/ruye/MachineLearning/lectures/ch2/node7.html.

11. Lizarraga J. A. et al. Advances in the Kinematics of Hexapod Robots: An Innovative Approach to Inverse Kinematics and Omnidirectional Movement *Applied Sciences.* 2024. Vol. 14, no. 18. P. 8171. URL: https://doi.org/10.3390/app14188171.

12. Короленко Я.Р., Павловська Ю.О. Моделювання руху крокуючого робота з несправною кінцівкою у середовищі MATLAB. *Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 2024.. Том 35 (74), №5.

13. Xia H., Zhang X., Zhang H. A New Foot Trajectory Planning Method for Legged Robots and Its Application in Hexapod Robots. Applied Sciences. 2021. Vol. 11, no. 19. P. 9217. URL: https://doi.org/10.3390/app11199217

14. Isvara Y. et al. Terrain adaptation gait algorithm in a hexapod walking robot 13th *International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV)*, (Singapore, 10–12 December 2014.) 2014.

15. Platov I., Pavlovskyi O., Pavlovska Y. Hexapod movement algorithms to avoid interference. angular movement. *Bulletin of Kyiv Polytechnic Institute. Series Instrument Making.* 2021. No. 62(2). P. 58–64.

16. Darbha N. H. An Optimization Strategy for Hexapod Gait Transition. 2017. URL: http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=wright1514915943875043.

17. Platov I., Pavlovskyi O., Pavlovska Y. Analysis of circuit solutions for choosing the converter for a walking hexapod robot. *Bulletin of Kyiv Polytechnic Institute. Series Instrument Making.* 2022. No. 63(1). P. 77–81.

18. Platov I. et al. Walking Hexapod for Demining Territory of Postwar Ukraine / International Conference of Young Professionals. *GeoTerrace-2024.* Lviv, Ukraine,. 2024. P. 1–5. URL: https://doi.org/10.3997/2214-4609.202451002O

19. Платов І. М., Павловський О. М. Гексапод для діагностики складних споруд та інженерних об'єктів. Система живлення. *Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні* : збірник праць конференції. (Київ, 08-09 грудня 2020 р.). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2020. С. 37–41.

Platov I.M., Pavlovska Yu.O. RESEARCH ON THE DEPENDENCE OF THE ENERGY CONSUMPTION OF A WALKING HEXAPOD ON THE TRAJECTORY OF LIMB MOTION UNDER CONDITIONS OF UNCERTAINTY

The article focuses on improving the motion control system of a hexapod walking robot by optimizing energy consumption during different limb movements.

Highly mobile walking robots can move both in the horizontal and vertical planes. Algorithmically, these movements do not differ significantly, except for the load on the servomotors and their energy consumption. Therefore, the article examines the energy consumption of servomotors specifically during the hexapod's vertical motion, as it represents the most extreme operating mode.

Based on the analysis conducted, it was concluded that the practical implementation of the proposed methods and algorithms requires a comprehensive approach. This approach should ensure the development of an adaptive and energy-efficient motion control algorithm for the hexapod under uncertain conditions.

To design such a control algorithm, a mathematical model was developed that takes into account the specific features of the hexapod's vertical movement. Simulations and energy consumption calculations were performed for various limb movement trajectories and gait modes. Energy efficiency was investigated for the most common hexapod gaits: tripod, biped, and wave. Two limb trajectory generation models were proposed to improve adaptability and generalize the control algorithm: elliptical arc and cycloid.

According to the MATLAB simulation results, the tripod gait demonstrated the highest energy efficiency during vertical climbing but was the least stable for vertical motion due to friction forces between the limbs and the surface. Conversely, the wave gait exhibited the highest energy consumption and the lowest speed but proved to be more stable. The biped gait provided an optimal balance between energy consumption and stability.

The use of a modified limb motion control algorithm was proposed and substantiated, involving the switching of trajectory types and gaits depending on changes in environmental conditions to enhance the overall energy efficiency of the system.

Key words: *modeling, energy consumption, gait, trajectory, robot, hexapod, kinematics, limb, uncertain conditions, MATLAB.*

УДК 004.032.6
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/25

Потрашкова Л.В.
Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця

Пазюра К.С.
Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця

МЕТОДИКА ВИБОРУ ХАРАКТЕРИСТИК ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ ДЛЯ ВЕБСАЙТІВ, ПРИСВЯЧЕНИХ ОБРАЗОТВОРЧОМУ МИСТЕЦТВУ

Стаття присвячена питанням використання доповненої реальності (AR) на вебсайтах з тематики образотворчого мистецтва. У сучасному цифровому світі доповнена реальність відкриває нові можливості для взаємодії з мистецтвом, створюючи унікальний користувацький досвід. Використання доповненої реальності на мистецьких вебсайтах має значний потенціал для залучення авдиторії та збагачення її досвіду. Попри перспективи, питання ефективного використання доповненої реальності для мистецьких вебсайтів досі недостатньо досліджене.

Метою даного дослідження є розробка методики вибору характеристик доповненої реальності для вебсайтів мистецької тематики з акцентом на підвищення залученості аудиторії.

У рамках дослідження проведено порівняльний аналіз трьох типів доповненої реальності (AR з цільовим зображенням, AR-маски, AR у просторі) за такими критеріями, як залучення користувачів, відповідність цілям мистецького вебсайту, ступінь інтерактивності та фокусування на об'єкті, що популяризується. За результатами аналізу визначено, що найкращим рішенням для культурно-мистецьких вебсайтів з погляду популяризації творів мистецтва є застосування AR з цільовим зображенням.

Також проведено порівняльний аналіз трьох популярних інструментів для створення AR-додатків (EyeJack, Adobe Aero, Unity з плагіном Vuforia) за такими критеріями, як відсутність обмежень на розмір файлів з AR-контентом, простота розробки, підтримка файлів різних форматів, вартість та функціональність. В результаті цього аналізу виявлено, що кращим AR-інструментом для некомерційних проєктів є рушій Unity з плагіном Vuforia, завдяки наявності безкоштовній версії та широким можливостям розробки.

Зазначені результати аналізу лягли в основу розробленої методики, спрямованої на обґрунтування рішень щодо інтеграції доповненої реальності на вебсайти, присвячені образотворчому мистецтву, з урахуванням конкретних цілей сайту, технічних можливостей та бюджету розробників.

Отримані результати можуть бути використані для подальших досліджень у галузі візуалізації творів мистецтва за допомогою доповненої реальності.

Ключові слова: *доповнена реальність, AR (Augmented Reality), мистецтво вебсайт, онлайн-галерея, користувацький досвід, взаємодія, культура, технології в мистецтві, інтерактивне мистецтво, цифрова культура, веб-розробка, мобільні додатки.*

Постановка проблеми. Сучасні цифрові технології, зокрема доповнена реальність (augmented reality, AR), відкривають нові можливості для взаємодії з мистецтвом, створюючи інтерактивний досвід, що поєднує віртуальний і фізичний світи. Незважаючи на перспективи цієї технології, її ефективне використання на вебсайтах, присвячених мистецтву, залишається недостатньо вивченим. Існує брак методик і чітких рекомендацій для інтеграції AR в онлайн-галереї. На практиці AR на мистецьких платформах часто має обмежений функціонал і не забезпечує належної глибини занурення у художній контекст, що свідчить про потребу в комплексних дослідженнях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сьогодні процес створення доповненої реальності добре підтримується інформаційними ресурсами. В інтернеті можна знайти чимало джерел із детальним описом різних варіантів програмного забезпечення для розробки AR та інструкціями з їхнього використання [1–12]. Крім того, наявні численні наукові огляди, що аналізують застосування технології доповненої реальності в різних сферах – від маркетингу та реклами до освіти й культурно-просвітницької діяльності [13–15]. На цій основі розроблені теоретичні та методичні рекомендації щодо практичного застосування доповненої реальності. Наприклад, у [16] про-

понується чотири основні етапи для створення AR-проекту: визначення аудиторії та цілей, встановлення тригерів для активації контенту, розробка й формування контенту, а також інтеграція AR у фізичне й соціальне середовище. Інші джерела, як [17], включають також етапи тестування прототипів та оптимізації якості контенту, а [18] описує застосування методу Agile для гнучкої розробки, що включає визначення цілей, аудиторії та проектних вимог.

Більшість запропонованих етапів AR-проектування є досить загальними і потребують адаптації для конкретних проектів. Саме тому це дослідження зосереджено на створенні рекомендацій для підтримки прийняття рішень на різних етапах проектування AR для культурно-мистецьких вебсайтів, враховуючи можливі альтернативи та критерії для їх оцінки.

Постановка завдання. Метою статті є розробка методики вибору характеристик доповненої реальності для вебсайтів мистецької тематики з акцентом на підвищення залученості аудиторії.

Виклад основного матеріалу. Доповнена реальність стала потужним інструментом, що пропонує захоплюючий досвід, який поєднує фізичну та цифрову сфери. Від інтерактивних виставок до екскурсій та сюжетних пригод – доповнена реальність може змінити те, як користувачі сприймають культурний та мистецький контент в Інтернеті. Однак інтеграція доповненої реальності на вебсайти вимагає ретельного планування та прийняття рішень на різних етапах розробки. Для того щоб рішення щодо використання AR на вебсайті були обґрунтованими та відповідали цілям проєкту і потребам користувачів, важливо підходити до вибору характеристик доповненої реальності та її контенту системно.

Для забезпечення підтримки прийняття рішень під час проєктування доповненої реальності, призначеної для впровадження на культурно-мистецьких вебсайтах, важливо запропонувати набір можливих альтернатив разом з їхньою оцінкою на основі різних критеріїв. При цьому процес прийняття проєктних рішень можна структурувати за декількома етапами:

Етап 1: Вибір варіантів призначення доповненої реальності на сайті. На етапі концептуалізації важливо визначити цілі інтеграції доповненої реальності у вебсайт. Чи є метою проєкту підвищення залученості відвідувачів, надання освітнього досвіду або створення захоплюючих історій? Особи, які приймають рішення, повинні передбачити потенційні варіанти використання доповненої реальності, враховуючи такі фактори, як демографія аудиторії, релевантність контенту та технологічна можливість. Підтримка прийняття рішень на цьому етапі передбачає вивчення різних варіантів використання доповненої реальності, оцінку їхньої доцільності та відповідності загальним цілям вебсайту.

Проєкти з впровадження AR на культурно-мистецькі вебсайти можуть мати такі варіанти призначення:

– популяризація творів мистецтва;

– залучення уваги відвідувачів сайту до біографії художників;

– ознайомлення відвідувачів сайту із виставками та музеями;

– підвищення оригінальності сайту.

Популяризація творів мистецтва передбачає створення додатку або функції вебсайту, яка дозволяє користувачам розглядати та вивчати саме твори мистецтва у доповненій реальності. Це також може включати анімації з використанням доповненої реальності, під час яких користувачі можуть розглядати деталі картин, слухати аудіогіди або читати інформацію про твори, щоб отримати глибше розуміння. Доцільно також враховувати можливість віртуального розміщення творів мистецтва в реальних просторах користувачів, що дозволить їм досліджувати та взаємодіяти з творами у своєму оточенні.

Залучення уваги відвідувачів сайту до біографії художників може включати створення додаткового контенту, який дозволяє користувачам дізнатися більше про життя та творчість художників через використання доповненої реальності. Наприклад, анімація портретів, віртуальні інтерв'ю з ними.

Ознайомлення відвідувачів сайту із виставками та музеями може включати створення віртуальних турів або підготовку віртуальних виставок, які дозволяють користувачам досліджувати виставки та музеї в доповненій реальності, навіть якщо вони не мають можливості відвідати їх фізично. Також можна використати доповнену реальність для створення іммерсивного досвіду взаємодії з експонатами, де користувачі можуть вивчати деталі та отримувати додаткову інформацію про предмети.

Підвищення оригінальності сайту може включати впровадження інтерактивних елементів доповненої реальності, таких як віртуальні об'єкти або анімації, які додають цікавості та оригінальності

до вебсайту. Також можна створити ігри або розважальні додатки, які використовують доповнену реальність для створення унікального досвіду для користувачів.

Кожен проект з використанням доповненої реальності є унікальним. Для досягнення максимального ефекту необхідно розробляти індивідуальні рішення, які відповідають конкретним завданням та умовам. Важливо враховувати як творчі аспекти, так і технічні обмеження.

Етап 2: Вибір типу доповненої реальності та її контенту. Підтримка прийняття рішень на цьому етапі передбачає оцінку різних типів доповненої реальності з урахуванням призначення AR-проєкту, визначеного на етапі 1.

Альтернативні типи доповненої реальності:

– AR з цільовим зображенням;

– AR-маски;

– AR у просторі.

Критерії оцінювання:

A: залучення користувачів (оцінка того, наскільки ефективно кожен тип доповненої реальності залучає користувачів до взаємодії з вебсайтом та його контентом);

B: відповідність цілям вебсайту (як добре кожен тип доповненої реальності відповідає загальним цілям та концепції вебсайту, таким як популяризація творів мистецтва, освітній досвід, залучення уваги тощо);

C: фокусування на зображеннях, що підлягають популяризації (наскільки ефективно кожен тип доповненої реальності може акцентувати увагу на деталях і унікальності мистецьких творів, фотографій художників, зображенні експонатів виставок тощо, залежно від призначення AR-проєкту);

D: ступінь інтерактивності (оцінка можливостей користувачів взаємодіяти з AR-контентом та відчувати себе активними учасниками віртуального досвіду).

Запропоновані критерії дозволяють оцінити переваги кожного з типів доповненої реальності та вибрати найкраще рішення для конкретного проєкту. При цьому остаточний вибір буде залежати від цілей проекту.

Результати оцінювання різних типів доповненої реальності за умови, якщо призначенням AR-проєкту є популяризація творів мистецтва, наведено в табл. 1.

Наведені оцінки свідчать про те, що AR з цільовим зображенням є найкращим рішенням для культурно-мистецьких вебсайтів з погляду популяризації творів мистецтва.

Таблиця 1

Результати оцінювання трьох типів доповненої реальності за декількома критеріями (за умови націленості AR-проєкту на популяризацію творів мистецтва)

Тип AR-контенту	A	B	C	D	Середня оцінка
AR з цільовим зображенням	4	5	5	4	4.5
AR-маски	5	3	4	5	4.25
AR у просторі	3	4	3	3	3.25

Далі необхідно визначитися з типами AR-контенту, який буде створено. Як альтернативні варіанти анімованого AR-контенту можуть розглядатися:

– анімація картин;

– анімація фото художників;

– відео з виставок;

– анімація елементів оформлення, зокрема банера.

Вибір варіанту AR-контенту залежить від призначення AR-проєкту, яке було встановлене на етапі 1.

Для визначення найкращого варіанту типу контенту доповненої реальності з цільовим зображенням можна застосувати метод парних порівнянь. Цей метод передбачає порівняння кожного варіанту з кожним іншим, з подальшим присвоєнням варіантам балів згідно з результатами порівнянь. Після цього, сумування всіх балів дозволить визначити, який варіант вважається найбільш підходящим з урахуванням важливих критеріїв (табл. 2).

Таблиця 2

Результати оцінювання варіантів AR-контенту за допомогою методу парних порівнянь (за умови націленості AR-проєкту на популяризацію творів мистецтва)

Тип анімації	Анімація фото художників	Відео з виставок	Анімація елементів оформлення	Анімація картин	Сума балів
Анімація картин	+1	+1	+1	-	3
Анімація елементів оформлення (банер)	+1	+1	-	0	2
Відео з виставок	+1	-	0	0	1
Анімація фото художників	-	0	0	0	0

Отже, за результатами застосування методу парних порівнянь, «Анімація картин» виявляється найбільш перспективним варіантом для використання у вебсайті з доповненою реальністю, призначеною для популяризації творів мистецтва.

Етап 3: Вибір програмного забезпечення. Переходячи до оцінки технічної здійсненності, увага переноситься на оцінювання інструментів, необхідних для впровадження доповненої реальності. Це передбачає оцінку сумісності з існуючими платформами вебсайтів, вивчення варіантів розробки і розгляд факторів масштабованості. Потрібно зважити компроміси між вартістю розробки, часом виходу на ринок і сумісністю з технологічним стеком вебсайту. Проведення ретельної оцінки технічної здійсненності забезпечує безперебійний процес впровадження та мінімізує потенційні перешкоди в майбутньому.

При виборі програмного забезпечення для створення доповненої реальності для елементів контенту сайту важливо дотримуватися системного підходу [1, 12, 14, 17].

У цьому дослідженні розглянемо три альтернативи програмних застосунків для створення доповненої реальності на основі маркерів:

– EyeJack;

– Adobe Aero;

– Unity з плагіном Vuforia.

Критерії оцінки:

A: відсутність обмежень на розмір файлів з AR-контентом;

B: простота розробки;

C: підтримка файлів різних форматів;

D: вартість;

E: функціональність.

У таблиці 3 наведено оцінку варіантів програмного забезпечення за вищезазначеними критеріями.

Аналіз функціональних можливостей та вартості розглянутих варіантів програмного забезпечення показав, що Unity з Vuforia є найкращим вибором для некомерційних проєктів завдяки своїй безкоштовній версії та широким можливостям розробки. Поєднання Unity з Vuforia дозволяє розробникам створити спеціалізований мобільний додаток для візуалізації доповненої реальності, який може стати цифровим екскурсоводом по вебгалереї. Застосунок EyeJack підходить тільки для простих проєктів. Adobe Aero є доступним безкоштовно лише для тих розробників, які мають ліцензійний пакет Adobe Creative Cloud.

Таблиця 3

Результати оцінювання трьох варіантів програмного забезпечення для створення доповненої реальності

Програмне забезпечення	Критерії					Зважена сума балів
	A	B	C	D	E	
	0,1	0,2	0,3	0,1	0,3	
EyeJack	0	1	1	0	0	0,5
Adobe Aero	0	1	1	0	0	0,5
Unity з плагіном Vuforia	1	0	1	1	1	0,8

В цілому, з результатів оцінювань, здійснених на етапах проєктування 1–3, можна зробити висновок, що для сайтів з мистецької тематики більш доцільним є застосування доповненої реальності із використанням творів мистецтва як цільових зображень, що найкраще сприятиме популяризації цих творів. Найкращим варіантом програмного забезпечення з погляду поєднання дешевизни та функціональності є рушій Unity з плагіном Vuforia.

Висновки. У дослідженні представлена методика, яка надає інструментарій для прийняття зважених рішень щодо інтеграції елементів доповненої реальності в дизайн вебсайтів мистецької спрямованості. Методика об'єднує рекомендації для підтримки прийняття рішень на різних етапах проектування AR для культурно-мистецьких вебсайтів, з описанням можливих альтернатив і критеріїв для їх оцінювання. Методика може бути використана як основа для створення якісних AR-проектів, що сприяють популяризації мистецтва. Для подальших досліджень перспективним напрямком є розробка інструментів автоматизації процесу прийняття рішень на основі запропонованої методики.

Список літератури:

1. Степанюк О., Січко Т. Порівняльний аналіз інструментів для побудови додатків з доповненою реальністю. комп'ютерні технології обробки даних: наук. конф., м. Вінниця, 10 груд. 2021 р. Вінниця, 2021. С. 98–101.

2. Artivive. URL: https://bridge.artivive.com/editor (дата звернення: 26.09.2024).

3. Eyejack. URL: https://creator.eyejackapp.com/ (дата звернення: 26.00.2024).

4. Onirix. URL: https://www.onirix.com/learn-about-ar/the-different-types-of-augmented-reality/ (дата звернення: 26.09.2024).

5. ARToolKit. URL: http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/ (дата звернення: 14.10.2024).
6. ARKit. URL: https://developer.apple.com/augmented-reality/ (дата звернення: 14.10.2024).
7. ARCore. URL: https://developers. google.com/ar/ (дата звернення: 14.10.2024).
8. Best Frameworks for Developing Augmented Reality Apps. URL: https://saad-arshed.medium.com/best-frameworks-for-building-augmented-realityapps-c5ec07575441 (дата звернення: 14.10.2024).
9. Best Tools for Building Augmented Reality Mobile Apps. URL: https://rubygarage.org/blog/best-tools-for-building-augmented-reality-mobile-apps (дата звернення: 14.10.2024).
10. EasyAR. URL: https://www.easyar.com/ (date of access: 14.10.2024).
11. What is Unity 3D & What is it Used For. URL: https://conceptartempire.com/what-is-unity/ (дата звернення: 24.10.2024).
12. Потрашкова Л., Гмирак М. Дерево рішень з вибору програмного забезпечення для створення доповненої реальності. Наукові записки. 2023. № 2 (67). С. 42–52. URL: http://nz.uad.lviv.ua/en/articles/decision-tree-for-selecting-software-for-creating-augmented-reality/
13. Доповнена та віртуальна реальність. Створення власних ефектів за допомогою додатка «Artivive». Освітній проект «На Урок» для вчителів. URL: https://naurok.com.ua/dopovnena-ta-virtualna-realnist-stvorennya-vlasnih-efektivza-dopomogoyu-dodatka-artivive-252591.html (дата звернення: 26.09.2024).
14. Климович Ю. Ю. Використання доповненої реальності як засобу візуалізації навчального контенту. Наукова спільнота. 2022. Т. 1, № 12. С. 37–39.
15. AR in Museums. URL: https://virtualrealitypop.com/ar-in-museums- 890b0a48e7a5 (дата звернення: 26.09.2024).
16. Camba J. D., Contero M. From reality to augmented reality: Rapid strategies for developing marker-based AR content using image capturing and authoring tools. 2015 IEEE frontiers in education conference (FIE), Camino Real El Paso, El Paso, TX, USA, 21–24 October 2015. 2015. URL: https://doi.org/10.1109/fie.2015.7344162 (дата звернення: 18.10.2024).
17. Манцуровський М. Методика додавання AR контенту до творів живопису: магістерська робота. Харків, 2021. 103 с.
18. AR Agile Project Management. https://codereality.net/ar-for-eu-book/chapter/development/projectGuide/agileProjectManagement/ (дата звернення: 10.10.2024).

Potrashkova L.V., Paziura K.S. A METHODOLOGY FOR SELECTING AUGMENTED REALITY CHARACTERISTICS FOR WEBSITES DEDICATED TO THE VISUAL ARTS

The article is devoted to the issues of using augmented reality (AR) on websites on the subject of fine arts. In the modern digital world, augmented reality opens up new opportunities for interaction with art, creating a unique user experience. The use of augmented reality on art websites has significant potential for attracting the audience and enriching its experience. Despite the prospects, the issue of effective use of augmented reality for art websites is still insufficiently researched.

The purpose of this study is to develop a methodology for selecting augmented reality characteristics for art websites with an emphasis on increasing audience involvement.

The study conducted a comparative analysis of three types of augmented reality (AR with a target image, AR-masks, AR in space) according to such criteria as user engagement, compliance with the goals of the art website, the degree of interactivity and focus on the object being promoted. The analysis results determined that the best solution for cultural and artistic websites in terms of popularizing works of art is the use of AR with a target image.

A comparative analysis of three popular tools for creating AR applications (EyeJack, Adobe Aero, Unity with the Vuforia plugin) was also conducted according to such criteria as the absence of restrictions on the size of files with AR content, ease of development, support for files of various formats, cost and functionality. As a result of this analysis, it was found that the best option for non-commercial projects is the Unity engine with the Vuforia plugin, due to the availability of a free version and wide development capabilities.

The specified analysis results formed the basis of the developed methodology aimed at substantiating decisions on the integration of augmented reality into websites dedicated to fine arts, taking into account the specific goals of the site, technical capabilities and budget of developers.

The results obtained can be used for further research in the field of visualization of works of art using augmented reality.

Key words: *augmented reality, AR (Augmented Reality), art website, online gallery, user experience, interaction, culture, technology in art, interactive art, digital culture, web development, mobile applications.*

УДК 769.91: 004.032.6
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/26

Потрашкова Л.В.
Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця

Коваленко В.І.
Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця

МЕТОДИКА РОЗРОБКИ ДИЗАЙНУ ВЕБСАЙТУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ УКРАЇНСЬКОГО ЕТНОСТИЛЮ

Стаття присвячена застосуванню українського етностилю у дизайні вебсайтів. Інтеграція елементів етностилю у вебресурс дозволяє створювати емоційний зв'язок із місцевою аудиторією, використовуючи близьку їй візуальну мову. Це підвищує довіру користувачів до ресурсу, покращує їхнє враження та загальне сприйняття бренду. Унікальність графічного оформлення, побудованого на етнічних мотивах, також сприяє виділенню вебсайту серед конкурентів у глобальному цифровому середовищі.

Незважаючи на зростання кількості досліджень, присвячених етностилю в корпоративному дизайні, зокрема в його українському сегменті, все ще бракує системних рекомендацій щодо підтримки проєктних рішень для формування етнічного колориту цифрових продуктів, зокрема вебсайтів. У зв'язку з цим метою дослідження є розробка методики створення дизайну вебсайту, ***який викликає асоціації з українською культурою та народною творчістю.***

Відповідно до заданої мети у статті розроблено методику, яка забезпечує обґрунтування рішень із інтеграції елементів українського етностилю у веб-дизайн. У процесі формування методики здійснено анкетування експертів, яке дозволило визначити елементи фірмового стилю, що здійснюють найбільший вплив на формування в цільової аудиторії етнічних асоціацій із брендом. За допомогою багатокритерійного оцінювання визначено елементи дизайну сайту, які формують етнічний колорит ресурсу. На основі аналізу літератури та практичних прикладів створено добірку символів, кольорів, шрифтів і орнаментів для таких елементів фірмового стилю, як логотип, декоративні графічні елементи, типографіка, фонова графіка та інші дизайнерські складові, що викликають стійкі асоціації з Україною.

Методика допомагає вибрати такі елементи дизайну вебсайту, які є найбільш важливими для створення етнічного колориту сайту, а також вибрати конкретні варіанти реалізації цих елементів, які викликають асоціації з ***українською культурою та народною творчістю****.*

Ключові слова: *дизайн вебсайту, корпоративна айдентика, етностиль, національний колорит, анкетування, оцінювання альтернатив, ранжування.*

Постановка проблеми. У сучасному світі, де активно розвиваються процеси глобалізації та міжнародної інтеграції, особливої актуальності набуває збереження культурної самобутності народів, підтримка їхніх традицій, народного мистецтва та унікальної візуальної мови. У цьому контексті важливим є створення вебдизайну, який враховує етнічні стилі та естетичні особливості різних культур.

Використання етностилю в дизайні вебсайтів має значний вплив, оскільки сприяє формуванню унікального образу цифрового ресурсу. Кожна культура, будучи самобутньою, втілює власні усталені цінності, традиції та символи, які визначають її ідентичність. Інтеграція елементів етностилю країни-орієнтованості вебресурсу дозволяє створювати емоційний зв'язок із місцевою аудиторією, використовуючи близьку їй візуальну мову. Це підвищує довіру користувачів до ресурсу, покращує їхнє враження та загальне сприйняття бренду. Унікальність графічного оформлення, побудованого на етнічних мотивах, також сприяє виділенню вебсайту серед конкурентів у глобальному цифровому середовищі.

Впровадження українського етностилю в дизайн вебсайтів відіграє важливу роль у збереженні національної спадщини, а також у популяризації української культури на міжнародному рівні. Український етностиль формує емоційний зв'язок із місцевою аудиторією та українською діаспорою, викликаючи асоціації з автентичністю й культурною глибиною. Окрім того, інтеграція таких елементів дозволяє брендам і цифровим платформам виділятися на світовому ринку, де

культурна унікальність стає ключовим чинником конкурентної переваги.

Як приклади реалізації українського етностилю в корпоративному дизайні можна навести бренди «ЕтноХата» [1] та «Шукай» [2], які активно інтегрують народні орнаменти та мотиви в айдентику. У випадку бренду «ЕтноХата», застосування українських графічних елементів дозволило створити впізнаваний образ, орієнтований на локальну та міжнародну аудиторію. Аналіз таких кейсів показує, як етнічний стиль сприяє диференціації бренду та підкреслює його автентичність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання створення корпоративної айдентики, яка враховує культурне розмаїття та етнічні особливості, активно досліджується у сучасних працях з графічного дизайну та брендингу. Одним із найвідоміших досліджень на цю тему є книга Наталії Удріс-Бородавко «Графічний дизайн з українським обличчям», у якій авторка аналізує особливості застосування українського етностилю в дизайні та розкриває методи інтеграції народних мотивів у сучасні дизайнерські рішення [3]. Крім цього, у дослідженнях [4, с. 213–221; 5, с. 15–33] аналізуються переваги включення культурних елементів в айдентику бренду, що допомагає компаніям встановлювати емоційний зв'язок з цільовою аудиторією та виділятися на конкурентному ринку. Також досліджується, як культурні елементи можуть допомогти брендам у глобальному контексті та підкреслюється їх роль у створенні автентичної корпоративної айдентики.

Стаття Сиваш І. О. «Мотиви етнодизайну в сучасній візуальній культурі» [6, с. 131–138] присвячена дослідженню ролі етнодизайну у формуванні української національної ідентичності та консолідації суспільства. У ній зазначається, що етнодизайн, через використання українських традиційних орнаментів, кольорів, шрифтів і національної символіки, стає інструментом збереження культурного спадку та візуальної ідентичності. Вплив етнодизайну поширюється на різні аспекти сучасного життя: графічний дизайн, бізнес, соціальні медіа, рекламу, що сприяє «українізації» і культурному відродженню. Авторка підкреслює, що у нинішніх умовах етнодизайн відіграє важливу роль не лише у візуальній культурі, а й у соціокультурних трансформаціях, спрямованих на об'єднання українців. Важливим є також впровадження етнодизайну у цифровому середовищі, що відкриває нові можливості для інтеграції традицій у сучасний кроскультурний контекст.

Незважаючи на зростання кількості досліджень, присвячених етностилю в корпоративному дизайні, зокрема його українському сегменту, все ще бракує системних рекомендацій щодо підтримки проєктних рішень для формування корпоративної айдентики з урахуванням мультимедійних носіїв фірмового стилю. Наприклад, вивчення візуальної мови в мультимедійних проєктах, таких як інтерактивні вебсайти чи мобільні додатки, вимагає подальших розробок.

Постановка завдання. Метою цього дослідження є розробка методики створення дизайну вебсайту, який викликає асоціації з українською культурою та народною творчістю.

Прикладна проблема: складність адаптації брендів до національного культурного контексту в умовах глобалізації.

Наукова проблема: відсутність структурованої методики для включення елементів етнічного стилю у дизайн вебсайтів із урахуванням національної специфіки та культурної особливості українського етносу.

Виклад основного матеріалу. Об'єктом дослідження є процес створення дизайну вебсайту, який використовує український етностиль як засіб формування культурної ідентичності бренду в умовах глобалізації.

Основні завдання процесу розробки дизайну вебсайту з елементами українського етностилю включають:

1) аналіз типових графічних елементів українського етностилю, зокрема орнаментів, кольорових рішень і символіки;

2) адаптація етнічних елементів до цифрового середовища – це процес модернізації традиційних мотивів (шрифти, кольори, орнаменти) для їхнього використання у вебдизайні, з урахуванням технічних і естетичних вимог цифрової платформи;

3) інтеграція етностилю в дизайн вебсайту – застосування адаптованих етнічних елементів у ключових компонентах вебсайту, таких як банери, інтерфейс, анімації та інші візуальні складові, для створення гармонійного етнічного стилю.

Цільова аудиторія вебсайту, розробленого із застосуванням українського етностилю, охоплює українських користувачів, які цінують автентичність і культурну значущість, а також міжнародну аудиторію, зацікавлену в унікальності та культурній самобутності українського стилю. Вебсайт має стати не лише джерелом інформації, але й платформою для популяризації українських традицій, цінностей та естетики, що викликає емоційний відгук у користувачів різних поколінь і культур.

На основі аналізу сучасних підходів до створення вебдизайну та врахування культурної адаптації було розроблено методику створення дизайну вебсайту із застосуванням українського етностилю.

Запропонована методика дає змогу інтегрувати елементи етнічного стилю української культури у вебдизайн, підкреслюючи культурну автентичність та унікальність бренду. Вона включає такі основні етапи:

Етап 1. Розробка візуальної айдентики з етнічними асоціаціями.

На цьому етапі проводиться вибір ключових елементів айдентики, які зможуть викликати в аудиторії етнічні асоціації, враховуючи їхній вплив на формування культурної ідентичності бренду.

Етап 1.1. Вибір елементів айдентики із етнічними асоціаціями.

Для визначення важливості кожного елемента айдентики з погляду створення етнічних асоціацій було проведено анкетування респондентів, якими виступили представники різних поколінь, різних професій та соціальних статусів. З цією метою була створена Google форма, яка дозволяла респондентам ранжувати такі елементи айдентики: кольорова гама, орнаменти та візерунки, логотип, шрифти, графічні паттерни, символіка та традиційні зображення.

Результати ранжування показали, що найбільш важливими елементами айдентики для створення асоціацій бренду з певною країною або культурою є логотип, шрифти та кольорова гама (табл. 1). Логотип особливо привернув увагу респондентів і був визнаний ключовим для етностильового сприйняття.

Для оцінки узгодженості суджень експертів під час ранжування було розраховано коефіцієнт конкордації:

$$K = \frac{12 \cdot S}{m^2 \left(n^3 - n\right)}, де\, S = \sum_{i-1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \left(r_{ij} - \frac{m \cdot (n+1)}{2} \right)^2,$$

де m – кількість експертів, n – кількість порівнюваних об'єктів.

Судження експертів вважаються узгодженими за умови:

$$K \cdot m \cdot (n-1) > \chi^{2табл},$$

де $\chi^{2табл}$ – табличне значення критерію Пірсона, знайдене для прийнятого рівня значущості $(\alpha = 0,05)$ та числа ступенів свободи $(n-1)$.

У даному випадку: n=6; m=10; $\chi^{2табл}$=11,07; $K = 0,27$.

Маємо: $K \cdot m \cdot (n-1) = 13,49 > \chi^{2табл}$, а отже узгодженість суджень підтверджено. Тобто більшість експертів вважають, що національний український колорит бренду краще всього зможуть передати такі елементи фірмового стилю, як логотип і шрифти.

Етап 1.2. Формування множини варіантів реалізації для кожного з елементів айдентики, вибраних на етапі 1.

На цьому етапі дослідження для кожного елементу айдентики, які були визначені на попередньому етапі, на основі аналізу літературних джерел [7–10] визначаються альтернативні варіанти реалізації, які несуть етнічні асоціації.

Колірна гама в корпоративній айдентиці відіграє ключову роль у створенні візуальної ідентичності бренду і в Україні традиційно використовуються специфічні комбінації кольорів. Жовто-синя гама символізує національні образи – небо та

Таблиця 1

Результати ранжування елементів айдентики за їхнім впливом на формування етнічного колориту бренду

Експерти	Ранги елементів фірмового стилю з погляду створення етнічних асоціацій					
	Кольорова гама	Орнаменти та візерунки	Логотип	Шрифти	Графічні паттерни	Ілюстрації
1	1	2	3	4	5	6
2	4	1	2	3	6	5
3	1	5	6	2	3	4
4	3	6	1	2	4	5
5	4	3	2	1	5	6
6	5	3	1	6	4	2
7	2	4	3	1	5	6
8	3	4	2	5	1	6
9	6	3	2	1	4	5
10	1	3	2	4	6	5
Сума	30	34	24	29	43	50
Ранги	3	4	1	2	5	6

пшеничні поля, відображені на прапорі. Червоний і чорний, пов'язані з народними вишивками, уособлюють життя, кохання та смуток, а також родючість і землю. Біло-синя гама асоціюється з чистотою, невинністю й божественним світлом. Зелено-жовта гама відображає природу, оптимізм і життєву енергію [7].

Шрифти, що відображають характерні риси певної культури, сприяють створенню автентичної атмосфери та встановлюють емоційний зв'язок із традиціями народу. Асоціації з українською національною культурою та традиціями закладені у такі шрифти [5]: рукописні (Козіяр, Volya), бруськові (Zvin Serif, Kyiv Region), зі засічками (Lugatype, Didot), готичні (Довбуш, Namu), моноширні (Brinky, Nyght Serif) і без засічок (Nastup Basic, Fixel).

У фірмовому знаку для втілення національної сутності бренду можуть бути використані образи поширених символів України. До таких образів, згідно [8, с. 195–210], належать: калина (символ краси й рідної землі), лелека (щастя та благополуччя), козак (відвага й свобода), вишиванка (культурна спадщина), пшениця (достаток), соняшник (тепло й гостинність), тризуб (державність), вінок (чистота й невинність) та вишня (життя й молодість). Кожен із цих образів може надати фірмовому знаку унікальну автентичність та культурний зв'язок із українською ідентичністю.

Елементи орнаментів в українському стилі несуть глибоке символічне значення та відображають культурну спадщину [9, с. 52–57]. Вони не лише прикрашають, а й утверджують національні цінності, духовність та ідентичність українців. У фірмовому стилі ці орнаменти допомагають створити унікальність і посилюють зв'язок з культурними традиціями. Орнаментам притаманне значення, яке може відрізнятися залежно від регіону, відображаючи різноманіття та багатство української символіки.

Серед популярних елементів є квадрат (символ достатку, гармонії та землі), ромб (символ родючості та союзу сонця і землі), ромб із крапкою (означає засіяні поля й достаток), коло (символ сонця, вічності й безперервності життя), а також рослинні мотиви. Наприклад, калина символізує любов і багатство, виноград – сімейне щастя, а мак – захист від лихого ока. Ці символи додають глибину та змістовність бренду, втілюючи національну естетику та духовність.

Рекламний персонаж – це вигаданий герой, що представляє бренд або продукт, створюючи емоційний зв'язок із аудиторією. Він може мати будь-яку форму: людини, тварини, міфічної істоти або навіть неживого об'єкта, але головне – бути цікавим, впізнаваним і відповідати іміджу бренду.

Серед можливих образів – козак, що символізує силу і волелюбність [10, с. 266–272], мавка як уособлення природи та таємничості, лелека, який асоціюється з миром та щастям, українські музичні інструменти, що підкреслюють культурну спадщину, або ж традиційні українські страви (вареники, борщ, сало) як символ гостинності й щедрості. Кожен з цих персонажів додає автентичності й національного колориту рекламному образу.

Етап 2. Розробка дизайну вебсайту з етнічними асоціаціями.

Розробка дизайну веб-сайту з етнічними асоціаціями є захоплюючим та важливим етапом в створенні унікального та привабливого онлайн-простору. Розробка дизайну з етнічними елементами відкриває можливості для створення вражаючих та змістовних веб-проектів, які відображають культурні цінності та спадщину народу.

Етап 2.1. Вибір елементів вебсайту для етнічного стилю.

Етнічні асоціації на вебсайті можуть бути передані такими елементами:

1. Елементами розробленого фірмового стилю (знак-логотип, кольори, шрифти, орнамент).
2. Ілюстраціями, відеороликами та анімацією.
3. Музичним оформленням.

Зазначені елементи вебдизайну були оцінені за декількома критеріями з погляду їхньої важливості для створення сайту з етнічним колоритом (табл. 2).

Як випливає з результатів оцінювання, для створення українського національного колориту вебсайту найкраще використовувати знак-логотип, який отримав найвищу зважену оцінку. Це пояснюється його здатністю міцно асоціюватися з українськими національними символами та ефективно підкреслювати ідентичність бренду. Шрифт також показав високий результат завдяки його потенціалу для створення унікального стилю через використання традиційних форм або індивідуального дизайну. Використання кольорової гами доповнює ці елементи, додаючи глибини національним мотивам, хоча її стандартність може обмежувати рівень унікальності.

Такі елементи, як орнаменти та музика, демонструють середній рівень ефективності в підкресленні етностилю вебсайту, але вимагають ретельного підбору для досягнення гармонії та оригінальності. Відео, хоча і має високу трудо-

Таблиця 2

Оцінювання елементів дизайну вебсайту з погляду їхньої ролі у створенні етнічного стилю

Елементи дизайну вебсайту	Критерії			
	Ступінь асоціації з Україною 0,6	Трудомісткість виконання 0,2	Унікальність дизайну 0,2	Зважена сума
Знак-логотип	5	1	5	4,2
Кольорова гама	3	5	2	3,2
Орнамент	3	3	3	3
Ілюстрації	2	3	3	2,4
Шрифт	4	5	3	4
QR-код	1	5	1	1,8
Фото	2	3	3	2,4
Відео	3	1	4	2,8
Музика	3	2	4	3

місткість, є потужним інструментом для створення динамічного зв'язку із культурою. Типові зображення та фото, незважаючи на нижчий рівень асоціативності, можуть бути ефективними за умови творчого підходу. Найнижчу оцінку отримав QR-код, адже його стандартний вигляд мало асоціюється з українським стилем, однак він може виступати функціональним додатком до загального дизайну.

Етап 2.2. Формування множини варіантів реалізації для елементів дизайну вебсайту.

Цей етап дослідженння передбачає формування варіантів реалізації ключових елементів дизайну вебсайту, які відображають національну ідентичність через візуальні традиційні та емоційні аспекти. Головною метою цього етапу є створення гармонійного поєднання традиційних українських мотивів із сучасними дизайнерськими рішеннями, що дозволяє підкреслити унікальність та автентичність проекту.

Обрані теми *ілюстрацій* включають природу, людей і історичні події. Для природи пропонуються зображення українських степів під блакитним небом, соняшникових полів, карпатських гір і мальовничих річок та озер. Лісові сцени можуть включати густі ліси, осінній ліс та хатинки на галявинах. Водяні пейзажі охоплюють річки з вербами, рибалок на човні й озера з лебедями.

Люди в ілюстраціях зображені у вишиванках та традиційних костюмах: дівчата у вінках, сім'ї в народному вбранні, фольклорні гурти та сцени з українських свят, таких як Івана Купала і Різдво. Історичні моменти включають козаків, битви за незалежність, Київську Русь, революцію, а також сучасну Україну з її містами й подіями.

Для створення українського *відео* на лендінгу можна використати ідеї з ілюстрацій. Важливо забезпечити високу якість зйомки з чітким зображенням, звуком та освітленням для комфортного перегляду. Різні ракурси, переходи й ефекти зроблять відео більш динамічним та цікавим. Додавання субтитрів підвищить доступність для міжнародної аудиторії та людей з вадами слуху.

Музичне оформлення може включати класику української естради, як-от «Ніч яка місячна» (Назар Яремчук), «Ой, у вишневому саду» (Софія Ротару) та «Україна» (Тарас Петриненко). З сучасних хітів підійдуть «Не твоя війна» (Океан Ельзи), «Ой у лузі червона калина» (Бумбокс), «Шум» (Go_A) та «Лови момент» (Антитіла).

Висновки. У роботі сформовано методику розробки дизайну вебсайту із застосуванням українського етностилю, яка включає послідовний підхід до створення візуальної айдентики та вебдизайну, що відображає культурні особливості та національні мотиви України. Методика передбачає використання етнічних мотивів у таких елементах дизайну вебсайту, як кольори, орнаменти, шрифти та графічні символи, що викликають асоціації з українською культурною спадщиною. Для кожного елементу дизайну було запропоновано кілька варіантів, що дозволяють втілити на сайті ідеї традиційної української символіки.

У запропонованій методиці увага приділяється створенню мультимедійних матеріалів, таких як ілюстрації, відео та музика, які підсилюють етнічний колорит та допомагають залучити як місцеву, так і міжнародну аудиторію. Таким чином, методика дозволяє забезпечити автентичність дизайну, враховуючи сучасні вимоги вебдизайну та ефективно передати культурні асоціації, що підвищує привабливість вебсайту.

Список літератури:

1. ЕтноХата. URL: https://etnoxata.com.ua/?gad_source=1&gclid=CjwKCAiA9IC6BhA3EiwAsbltONsQZxFBl9bc8urjxC_b6VK2kswH3yMoobCRTC_m0oQxfaKjYfIBnhoC-mEQAvD_BwE (дата звернення: 12.09.2024).
2. Шукай! Історія Києва у бронзових мініскульптурках. URL: https://shukai.com.ua/ (дата звернення: 12.09.2024).
3. Удріс-Бородавко Н. Графічний дизайн з українським обличчям. Київ: ArtHuss, 2023. 206 с.
4. Hajdas M. The Impact of Cultural Branding on Brand Equity – Exploratory Study. *Handel Wewnętrzny*. 2017. № 5. P. 213–221.
5. Schultz M., Hatch M. A cultural perspective on corporate branding. Brand Culture / ed. by J. E. Schroeder, M. S. Morling. London: Routledge, 2006. P. 15–33.
6. Сиваш І. О. Мотиви етнодизайну в сучасній візуальній культурі. *Вісник Національної академії керівних кадрів культури і мистецтв*. 2024. № 2. С. 131–138.
7. Завантажити безкоштовні українські шрифти для гравіювання // Gravirovka.UA. URL: https://gravirovka.ua/ukrainian-free-fonts/ (дата звернення: 04.05.2024).
8. Konieczna E. J. The meaning of symbols in drawings in the context of the military conflict in Ukraine. *Labor et Educatio*. 2023. № 11. С. 195–210.
9. Щербань А. Л., Бабкова Н. В. Навчальний посібник "Орнаментика та український орнамент": культурологічний аналіз. *Культура України*. 2022. № 75. С. 52–57.
10. Рудакова Н. І. Український історичний епос: художня трансформація образу козака. *Літературознавчі студії*. 2018. № 37 (2). С. 266–272.

Potrashkova L.V., Kovalenko V.I. METHODOLOGY FOR DEVELOPING A WEBSITE DESIGN USING UKRAINIAN ETHNICITY

The article is dedicated to the application of Ukrainian ethnostyle in website design. Integration of ethnic elements into a web resource allows you to create an emotional connection with the local audience using a visual language that is close to them. This increases users' trust in the resource, improves their impression and overall perception of the brand. The unique graphic design based on ethnic motifs also helps to make a website stand out from the competition in the global digital environment.

Despite the growing number of studies on ethnicity in corporate design, particularly in its Ukrainian segment, there is still a lack of systematic recommendations for supporting design decisions to shape the ethnic flavour of digital products, including websites. In this regard, the purpose of the study is to develop a methodology for creating a website design that evokes associations with Ukrainian culture and folk art.

In accordance with the set goal, the article develops a methodology that provides substantiation of decisions on integration of elements of Ukrainian ethnicity into web design. In the process of forming the methodology, an expert survey was conducted, which allowed to identify the elements of corporate identity that have the greatest impact on the formation of ethnic associations with the brand among the target audience. Using a multi-criteria evaluation, the article identifies the elements of website design that form the ethnic flavour of the resource. Based on the analysis of literature and practical examples, a selection of symbols, colours, fonts and ornaments for such corporate identity elements as the logo, decorative graphic elements, typography, background graphics and other design components that evoke strong associations with Ukraine was created.

The methodology helps to select the elements of website design that are most important for creating the ethnic flavour of the site, as well as to choose specific options for implementing these elements that evoke associations with Ukrainian culture and folk art.

Key words: *website design, corporate identity, ethnic style, national colour, questionnaire, evaluation of alternatives, ranking.*

УДК 004.415.2
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/27

Прокопович-Ткаченко Д.І.
Університет митної справи та фінансів

ГРАФІЧНА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ТА НЕЙРОМЕРЕЖЕВІ АЛГОРИТМИ: ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО МОНІТОРИНГУ СТАНІВ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

У статті представлено інноваційний підхід до моніторингу та керування станами інформаційно-технічних систем, що базується на використанні графічної візуалізації та нейромережевих алгоритмів. Графічна візуалізація дає можливість інтуїтивно зрозуміло представляти динамічні зміни стану систем, сприяючи швидкій оцінці ситуації та прийняттю рішень для її стабілізації. Інтеграція з моделями нейронних мереж дозволяє значно підвищити точність аналізу, моніторингу та прогнозування станів систем, що особливо актуально в умовах сучасних кіберзагроз.

Розроблений підхід включає автоматизацію процесів виявлення аномалій, аналізу мережевого трафіку та прогнозування потенційних загроз. У статті детально описано алгоритм навчання нейронних мереж для взаємодії з графічною візуалізацією, що дозволяє ефективно обробляти складні багатовимірні дані. Застосування цього підходу протестовано на реальних даних державних інформаційно-технічних систем, включаючи журнали подій, лог-файли та дані мережевого трафіку.

Результати експериментів демонструють, що впровадження графічної візуалізації та нейромережевих алгоритмів знижує кількість хибних спрацьовувань і забезпечує точність виявлення аномалій на рівні 95%, що на 20% перевищує ефективність традиційних методів. Крім того, графічна візуалізація значно спрощує процес управління системами, дозволяючи адміністраторам швидко реагувати на інциденти кібербезпеки або забезпечувати автоматизоване вирішення завдань без втручання людини.

Методологія є особливо корисною для державних структур, які стикаються з високим рівнем загроз у сфері кібербезпеки. Інтеграція цього підходу в існуючі системи кіберзахисту розширює їх функціональність, дозволяючи виявляти загрози, прогнозувати ризики та підтримувати стабільність критичних інформаційних систем. Перспективи використання такого підходу підтверджують його важливість для створення високонадійних систем кіберзахисту, які відповідають викликам сучасного інформаційного середовища.

Ключові слова: *інформаційна безпека, нейронні мережі, графічна візуалізація, аналіз стану, виявлення аномалій, прогнозування, кіберзахист.*

Постановка проблеми. Моніторинг стану інформаційних систем (ІС) є критично важливим завданням для забезпечення їхньої безпеки, функціональної стабільності та стійкості до зовнішніх і внутрішніх загроз. Сучасний розвиток інформаційних технологій супроводжується зростанням обсягів оброблюваних даних та ускладненням архітектури систем, що значно ускладнює ефективний аналіз стану з використанням традиційних методів. У таких умовах інтеграція сучасних нейромережевих алгоритмів стає необхідною для реалізації адаптивного захисту ІС. Нейронні мережі здатні виявляти приховані закономірності, аномалії та тренди у великих наборах даних, що дозволяє забезпечити точну оцінку поточного стану системи та прогнозувати її подальшу поведінку.

Графічна візуалізація даних відіграє важливу роль у побудові ефективних систем моніторингу, оскільки вона сприяє більшій інформативності та наочності аналізу. Візуалізація є також важливим компонентом для навчання та валідації нейромережевих моделей, що дозволяє адаптувати алгоритми до специфіки конкретних інформаційних систем. Інтеграція таких моделей дозволяє реалізувати автоматичне виявлення загроз, включаючи кібератаки, помилки конфігурації та несправності, завдяки глибокому аналізу патернів поведінки системи. Наприклад, сучасні дослідження демонструють ефективність використання глибоких нейронних мереж у кібербезпеці для динамічного аналізу трафіку та виявлення аномалій [1, ст. 6]. Також є позитивний досвід інтеграції машинного навчання у прогнозування вразливостей систем за допомогою автоматизованого аналізу векторів загроз [2].

Таким чином, синергія сучасних нейромережевих алгоритмів та візуалізаційних технологій створює передумови для більш ефективного моні-

торингу та адаптивного захисту інформаційних систем. Це особливо актуально в умовах зростаючої складності кіберзагроз і потреби в побудові стійких до атак цифрових середовищ.

Аналіз останніх досліджень публікацій. Інтеграція нейромереж у процеси адаптивного керування сучасними інформаційно-технічними системами (ІТС) є ключовим напрямом досліджень, який базується на використанні методів машинного навчання та алгоритмів оптимізації. Роботи, представлені у джерелах, висвітлюють різноманітні аспекти цього процесу, зокрема розробку моделей нейромереж, їхню взаємодію з системами [1] керування та застосування для виявлення аномалій та прогнозування. ()детально розглянули застосування глибоких нейронних мереж у безпекових задачах для аналізу мережевого трафіку в програмно визначених мережах (SDN). У роботі акцентується увага на здатності нейромереж адаптуватися до змін у патернах трафіку в реальному часі, що підкреслює їх ефективність у динамічному середовищі. Цей підхід може бути застосований до моніторингу складних ІТС для автоматичного виявлення загроз та забезпечення адаптивного керування [2, ст. 3; 3, ст. 5] зосереджуються на використанні машинного навчання для адаптивного виявлення загроз у хмарних системах. Цей підхід демонструє переваги нейромереж у виявленні нових векторів атак та швидкому реагуванні на них. Це свідчить про важливість інтеграції нейромереж для забезпечення адаптивного захисту та підвищення стійкості ІТС [2, ст. 7] зосереджуються на математичних основах та принципах роботи нейромереж, що є фундаментом для розробки адаптивних алгоритмів керування. Знання цих основ дозволяє створювати моделі, які не лише обробляють великі масиви даних, але й здатні швидко реагувати на зміни у середовищі [1, ст. 8; 2, ст. 7]. Дослідження [13, ст. 24] демонструє використання адаптивних нейромереж у керуванні квадрокоптерами за допомогою алгоритмів ковзного режиму. Висновки роботи підкреслюють важливість оптимізації взаємодії між нейромережею та об’єктами керування для забезпечення точності і стабільності системи [13, ст. 12, 15, ст. 10] вивчають застосування нейронних мереж у розробці алгоритмів керування ракетами, зокрема, використовуючи методи оптимізації для прогнозування траєкторій. Це яскравий приклад адаптивного керування у реальному часі, що може бути масштабованим для застосування в ІТС [14]. [15] та [17, ст. 2–6] досліджують можливості використання нейромереж для контролю технологічних процесів та управління потоками. Вони ілюструють, як адаптивні алгоритми можуть знижувати обчислювальні витрати та підвищувати ефективність керування за допомогою підходів глибокого навчання [14, ст. 5–7, 17, ст. 19]. Загалом, аналіз представлених робіт демонструє, що інтеграція нейромереж з метою адаптивного керування сучасними ІТС сприяє оптимізації процесів керування, знижуючи потребу в ручному втручанні, швидкому реагуванню на зміни середовища через здатність нейромереж до самонавчання, забезпеченню безпеки завдяки можливості автоматичного виявлення та нейтралізації загроз, а також ефективному прогнозуванню, що дозволяє заздалегідь оцінювати ризики та ухвалювати оптимальні рішення. Сучасні нейромережеві підходи є критично важливими для адаптивного керування складними ІТС у контексті зростаючих вимог до стабільності, безпеки та швидкодії [6, ст. 3].

Інтеграція нейромереж у процеси адаптивного керування є важливим напрямом розвитку сучасних інформаційно-технічних систем (ІТС), зокрема систем Інтернету речей (IoT). Завдяки здатності нейромереж до аналізу великих обсягів даних, виявлення аномалій та прогнозування змін у середовищі, вони забезпечують ефективність і безпеку цих систем у динамічних умовах. Основними перевагами застосування нейромереж у контексті захисту ІТС є підвищення адаптивності, оскільки нейромережі можуть динамічно підлаштовувати алгоритми керування до змін у поведінці систем або зовнішнього середовища, що особливо важливо для IoT-систем із великою кількістю пристроїв, що взаємодіють у реальному часі. Використання нейромереж дозволяє автоматично виявляти кіберзагрози, проводити аналіз вразливостей і реагувати на потенційні атаки без участі людини. Завдяки оптимізації даних і процесів керування, нейромережі знижують навантаження на системи IoT, підвищуючи ефективність використання обчислювальних та енергетичних ресурсів. Нейромережі можуть аналізувати великий потік даних у реальному часі, забезпечуючи швидке реагування на незвичайну активність, включаючи порушення конфіденційності чи функціональності IoT-пристроїв. Завдяки можливостям машинного навчання нейромережі здатні прогнозувати потенційні загрози, що дозволяє заздалегідь вживати заходів для їхньої нейтралізації. Інтеграція таких технологій є критично важливою для забезпечення стабільності, безпеки та функціональної стійкості сучасних ІТС, зокрема

в умовах зростаючої складності кіберзагроз і масштабування систем IoT.

Постановка завдання. Метою статті є розробка інноваційних підходів до моніторингу станів інформаційних систем на основі поєднання графічної візуалізації та нейромережевих алгоритмів. Використовуючи методи системного аналізу та синтезу, інформаційно-технічну систему було запропоновано представити як складну систему у математичному сенсі. Такий підхід дозволяє описати динаміку системи, її взаємодію із зовнішнім середовищем та внутрішніми компонентами, а також моделювати її поведінку під впливом різних факторів. У межах цього підходу складна система розглядається як багатовимірна структура, яка характеризується множинністю компонентів, ієрархічністю структури, нелінійністю взаємодій, динамічністю, стохастичністю, самоорганізацією та сенситивністю до початкових умов. Множинність компонентів передбачає, що система складається з великої кількості взаємопов'язаних елементів, кожен з яких може мати власні стани та функції. Ієрархічність структури означає, що компоненти системи організовані в ієрархічну структуру, де кожен рівень впливає на загальну динаміку [2, с. 8]. Нелінійність взаємодій характеризується складністю зв'язків між елементами, які ускладнюють прогнозування поведінки системи [3, ст. 9, 10]. Динамічність передбачає, що система постійно змінює свої стани в часі, адаптуючись до впливу зовнішніх і внутрішніх факторів [6, ст. 1]. Стохастичність вказує на можливість випадкових впливів, що ускладнюють моделювання. Самоорганізація забезпечує адаптацію до змін середовища та відновлення стабільності після збурень, тоді як сенситивність до початкових умов означає, що початкові параметри можуть суттєво впливати на подальший розвиток [14, ст. 2, 5 ст. 7–9]. Таке формалізоване представлення інформаційно-технічної системи дозволяє ефективніше застосовувати нейромережеві алгоритми для моделювання її поведінки, виявлення аномалій та розробки адаптивних підходів до управління та моніторингу. Включення графічної візуалізації забезпечує інтуїтивне уявлення про стан системи та є важливим інструментом для навчання та оптимізації нейронних мереж [4, ст. 2].

Мета: Розробка та впровадження оптимізованих методів підготовки вхідних даних для нейромережевих алгоритмів, що забезпечують ефективний аналіз великих обсягів інформації в інформаційно-технічних системах (ІТС), з метою підвищення їхньої продуктивності, стабільності та безпеки у динамічних умовах [5, ст. 7].

Ціль: Застосування методів агрегації, нормалізації, класифікації та графічної візуалізації для попередньої обробки вхідних даних з метою:

– мінімізації розміру та складності інформаційних потоків;

– пришвидшення процесу навчання нейронних мереж;

– підвищення точності виявлення аномалій та прогнозування потенційних загроз;

– зменшення обчислювальних витрат і забезпечення роботи алгоритмів у реальному часі;

– адаптації алгоритмів обміну даними між нейромережами та компонентами системи для покращення керованості ІТС у динамічних середовищах.

Результатом досягнення зазначеної мети стане підвищення ефективності використання нейромереж для аналізу та прийняття рішень в ІТС, що дозволить зменшити обчислювальну складність, забезпечити адаптивність системи до мінливих умов і підвищити її загальну функціональність.

У сучасних інформаційно-телекомунікаційних системах (ІТС) важливим є забезпечення ефективного моніторингу та адаптивного захисту від постійно змінюваних кіберзагроз. Одним із ключових викликів є оптимізація процесу підготовки вхідних даних для машинного навчання, що безпосередньо впливає на ефективність роботи нейронних мереж. Необхідність мінімалістичного та оптимізованого підходу до аналізу та синтезу керуючих алгоритмів полягає у зменшенні складності попередньої обробки даних, що сприяє прискоренню навчання нейронних мереж, підвищенню функціональної стабільності системи, а також її адаптивності до динамічних умов середовища.

Таким чином, постає завдання розробки методології, яка забезпечить:

– мінімізацію обсягу необхідних вхідних даних без втрати їхньої інформативності;

– адаптацію керуючих алгоритмів до мінливих кіберзагроз;

– підвищення швидкості навчання та точності роботи нейронних мереж;

– забезпечення функціональної стабільності системи в умовах непередбачуваних змін середовища.

Запропонований підхід має бути орієнтований на досягнення оптимального співвідношення між швидкістю навчання, адаптивністю та ефективністю нейронних мереж у контексті моніторингу та захисту ІТС.

Виклад основного матеріалу. З метою формалізації складної інформаційно-технічної системи (ІТС) розглянемо наступну модель, яка враховує

динамічність, ієрархічність і нелінійність взаємодій між компонентами системи [7, ст. 3].

Нехай система складається з n взаємопов'язаних компонентів, стан яких визначається вектором:

$$\mathbf{x}(t) = \left[x_1(t), x_2(t), \ldots, x_n(t)\right]$$

де $x_i(t)$ – стан i-го компонента системи в момент часу t.

Динаміку системи описує система диференціальних рівнянь:

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{F}\left(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{p}\right)$$

де $\mathbf{F}$ – нелінійна функція взаємодій між компонентами, $\mathbf{u}(t)$ – вектор зовнішніх впливів, $\mathbf{p}$ – вектор параметрів системи (включаючи стохастичні характеристики).

Зовнішній вплив може моделюватися стохастичним процесом або задаватися у вигляді функції, що змінюється в часі. Ієрархічність системи враховується через багаторівневу структуру, де кожен рівень описується власними рівняннями стану. Наприклад, для верхнього рівня можна ввести інтегровані показники $y(t)$, які залежать від станів нижчих рівнів:

$$y(t) = G\left(x_1(t), x_2(t), \ldots, x_m(t)\right)$$

де G – функція, що описує взаємодію між рівнями системи.

Сенситивність до початкових умов визначає залежність поведінки системи від початкового стану $\mathbf{x}(0)$, що може впливати на загальну траєкторію розвитку системи [10, ст. 12; 11, ст. 8].

Графічна візуалізація такої системи може бути реалізована через динамічні графи, де вузли представляють компоненти системи, а ребра – взаємодії між ними [8, ст. 3; 9, ст. 7]. Динамічні зміни станів вузлів і ваг ребер можуть відображатися в реальному часі для наочного аналізу та інтерактивного налаштування нейромережевих алгоритмів керування. Цей підхід забезпечує адаптивність і гнучкість у моніторингу складних інформаційно-технічних систем.

Висновки.

1. Динамічність: Модель враховує динамічні зміни станів компонентів системи через систему диференціальних рівнянь. Це дозволяє відстежувати еволюцію системи в часі.

2. Ієрархічність: Введення багаторівневої структури дозволяє моделювати складні взаємодії між різними рівнями системи, що підвищує точність і деталізацію моделі.

3. Нелінійність: Використання нелінійних функцій взаємодій між компонентами дозволяє моделювати реальні складні системи, де взаємодії не завжди є лінійними.

4. Сенситивність до початкових умов: Модель враховує вплив початкових умов на поведінку системи, що є важливим для прогнозування та аналізу стабільності системи.

5. Графічна візуалізація: Використання динамічних графів для візуалізації станів компонентів і їх взаємодій дозволяє наочно аналізувати систему та налаштовувати алгоритми керування в реальному часі.

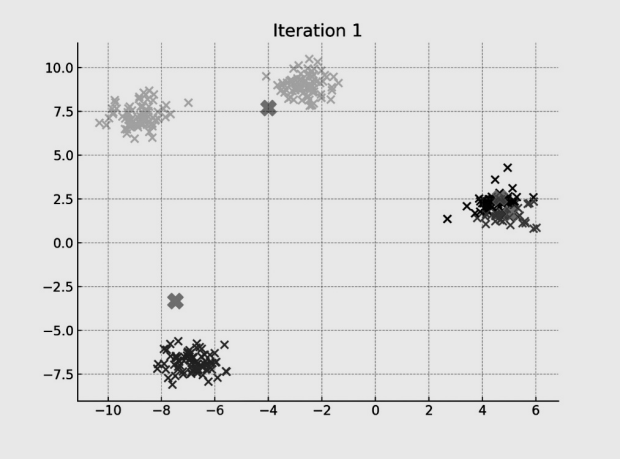
Візуалізація k-means у вигляді анімаційного графіка

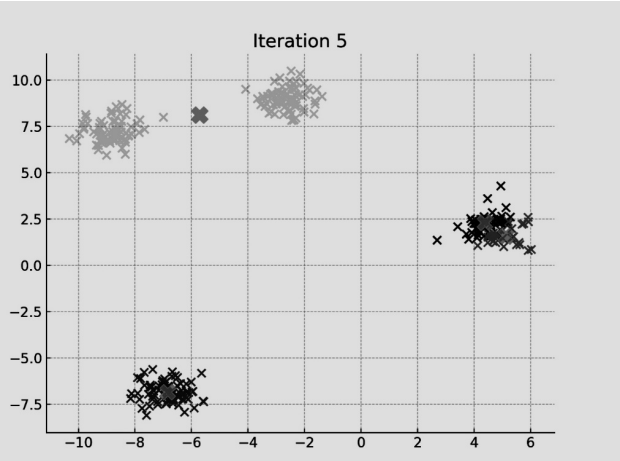
Для візуалізації алгоритму k-means у вигляді анімаційного графіка можна скористатися мовою програмування Python та бібліотекою Matplotlib. Нижче наведено приклад коду для створення такої анімації:

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.animation import FuncAnimation
from sklearn.datasets import make_blobs
from sklearn.cluster import KMeans
# Генерація даних
X,_ = make_blobs(n_samples=300, centers=4,
cluster_std=0.60, random_state=C
# Іniuiarizauia k-means
kmeans = KMeans(n_clusters=4, init='random', n_
init=1, max_iter=1, random_stat\epsilon
kmeans.fit(X)
# Функція для оновлення анімації
def update(frame):
    plt.clf()
    kmeans.max_iter = frame + 1
    kmeans.fit(X)
    y_kmeans = kmeans.predict(X)
    plt.scatter(X[:, 0], X[:, 1], c=y_kmeans, s=50,
cmap='viridis')
    centers = kmeans.cluster_centers_
    plt.scatter(centers[:, 0], centers[:, 1], c='red',
s=200, alpha=0.75, marker='X')
    plt.title(f'Iteration {frame + 1}')
# Створення анімації
fig = plt.figure()
ani = FuncAnimation(fig, update, frames=range(10),
repeat=False)
plt.show()
```

Цей код генерує дані, ініціалізує алгоритм k-means і створює анімацію, яка показує процес кластеризації на кожній ітерації.

Опис анімації алгоритму k-means як відображення стану складної системи.





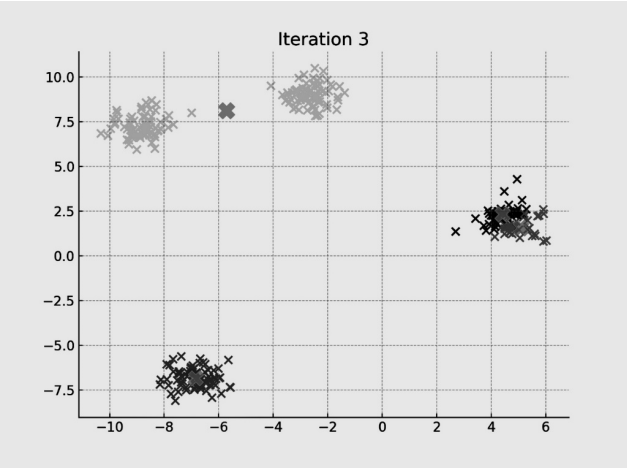


Рис. 1. На малюнку зображені 1, 2, 3 ітерації анімаційного фрагменту, що реалізує програма

Анімація демонструє процес роботи алгоритму кластеризації k-means, який може бути інтерпретований як спрощена модель поведінки складної системи в динаміці. Уявімо, що точки на графіку представляють різні компоненти складної інформаційно-технічної системи (ІТС), кожна з яких має власний стан, а центри кластерів відображають «цільові» стани або групи компонентів із подібними властивостями.

На кожній ітерації алгоритму:

1. Компоненти (точки) змінюють свої зв'язки з центрами кластерів відповідно до нових умов, що демонструє динамічність системи.

2. Центри кластерів (червоні позначки у вигляді "X") поступово переміщуються до середнього положення групи точок, які вони представляють. Це можна розглядати як самоорганізацію системи для досягнення стабільного стану.

3. Процес показує адаптацію системи: класифікація точок змінюється залежно від нових координат центрів, що відображає нелінійність взаємодій між компонентами системи.

Анімація наочно демонструє, як система поступово приходить до стану рівноваги, де кожен компонент стає частиною певної групи (кластера), а її структура стає більш організованою. Це відповідає концепції складної системи, яка адаптується до нових умов через взаємодію між її частинами.

Ця візуалізація може використовуватися для аналізу процесів кластеризації у великих наборах даних, прогнозування поведінки складних систем або налаштування параметрів алгоритмів нейронних мереж, які працюють з подібними типами даних.

k-means – це один із найпоширеніших алгоритмів кластеризації, що використовується для розбиття набору даних на кластерів. Основна мета цього алгоритму полягає у мінімізації внутрішньокластерної варіації, тобто забезпеченні максимальної схожості між точками всередині одного кластера та максимальної відмінності між точками різних кластерів [14, ст. 5]. Алгоритм починається з випадкового вибору початкових центрів кластерів, після чого кожна точка даних призначається до найближчого центру на основі метрики відстані, [16, ст. 24] зазвичай Евклідової. Далі центри кластерів оновлюються, обчислюючи середнє значення точок, що належать до кожного кластера. Цей процес повторюється до стабілізації центрів або досягнення максимального числа ітерацій. Завдяки своїй простоті та ефективності k-means є оптимальним вибором для задач кластеризації великих наборів даних, що не мають попередньо визначених міток [18, ст. 7].

Ми обрали k-means через його здатність ефективно працювати з великими обсягами даних і забезпечувати інтуїтивно зрозумілу інтерпретацію результатів. Алгоритм дозволяє легко візуалізувати процес кластеризації та спостерігати, як дані розподіляються по кластерах. Це робить його зручним для аналізу динамічних процесів [11, ст. 6; 12, ст. 7] у складних системах, де компоненти можуть групуватися за спільними харак-

теристиками. Крім того, k-means є швидким завдяки обчислювальній простоті, що є важливим фактором для реального часу моніторингу та адаптивного керування інформаційно-технічними системами [13, ст. 7]. Хоча алгоритм має певні недоліки, такі як чутливість до початкового вибору центрів і необхідність заздалегідь задавати кількість кластерів, ці обмеження не впливають критично на нашу задачу, оскільки кількість груп можна визначити на основі знань про систему, а ефект випадковості можна мінімізувати шляхом багаторазового запуску алгоритму. Таким чином, k-means є оптимальним вибором для моделювання динаміки та структури складних систем, що відповідає меті нашого дослідження.

Використання k-means у кібербезпеці має наукову новизну та значний потенціал для вдосконалення існуючих методів аналізу та захисту інформаційних систем. Хоча алгоритм k-means традиційно застосовується для задач кластеризації у таких сферах, як сегментація зображень [14, ст. 5], аналіз клієнтських даних чи маркетингові дослідження, його використання в кібербезпеці відкриває нові перспективи. Однією з ключових новацій є використання k-means для виявлення аномалій у мережевому трафіку. Алгоритм дозволяє класифікувати типи трафіку на основі схожості між зразками даних, що робить його ефективним інструментом для виявлення аномальних патернів, які можуть свідчити про спроби вторгнення, несанкціонований доступ або інші форми мережевих атак. Додатково k-means може використовуватися для класифікації кібератак шляхом групування подій за їхніми характеристиками, що дозволяє швидко ідентифікувати нові або маловідомі типи загроз. Ще однією важливою сферою застосування є моніторинг поведінки користувачів. Використання k-means для аналізу поведінкових патернів дозволяє визначати відхилення від норми, які можуть сигналізувати про компрометацію облікових записів або внутрішні загрози. Завдяки своїй здатності ефективно обробляти великі обсяги даних у реальному часі, k-means є незамінним для адаптивного моніторингу складних систем, що є актуальним у сучасних умовах кібербезпеки. Особливу цінність має інтеграція k-means із іншими алгоритмами, такими як нейронні мережі чи методи глибокого навчання, що дозволяє значно підвищити точність виявлення загроз і класифікації даних. Усе це доводить, що використання k-means у кібербезпеці має значну наукову новизну та сприяє розробці інноваційних рішень для захисту інформаційних систем. Графічна візуалізація станів систем дозволяє представити інформацію у вигляді інтуїтивно зрозумілих графів і схем. Для обробки таких моделей використовується багатошаровий персептрон із алгоритмом зворотного поширення.

Подальший розвиток методу аналізу стану інформаційно-технічних систем на основі графічної моделі, нейромережевих алгоритмів та метаевристичних методів оптимізації передбачає кілька ключових напрямів. Перш за все, удосконалення графічної моделі стану системи може бути досягнуто шляхом інтеграції динамічних графів, які враховують зміни зв'язків між елементами системи в реальному часі. Це дозволить враховувати не лише статичні взаємодії між компонентами, але й їхню динаміку, що критично важливо для складних систем, таких як Інтернет речей (IoT) чи промислові кіберфізичні системи.

Другою важливою складовою є розробка спеціалізованих архітектур нейронних мереж, орієнтованих на аналіз графових даних, наприклад, графових нейронних мереж (Graph Neural Networks, GNN). Такі архітектури можуть ефективно обробляти інформацію про зв'язки між вузлами графа та виявляти приховані патерни, які не видно у традиційних підходах до аналізу даних. Крім того, адаптація [4, ст. 11] нейромереж до роботи в умовах обмежених обчислювальних ресурсів, характерних для IoT-пристроїв, є перспективним напрямом для подальших досліджень.

Третім перспективним напрямом є вдосконалення метаевристичних методів оптимізації, що використовуються для налаштування параметрів нейромереж. Інтеграція таких методів, як генетичні алгоритми, рій частинок чи оптимізація зграї кажанів, з сучасними методами глибокого навчання дозволить значно підвищити ефективність та швидкість навчання моделей, а також забезпечити їхню адаптивність до змінюваних умов середовища [16, ст. 2; 17, ст. 8].

Ще одним важливим аспектом є впровадження підходів до навчання з підкріпленням [19, ст. 9] для оптимізації прийняття рішень у реальному часі. Це дозволить системі не лише аналізувати поточний стан і прогнозувати розвиток ситуації, але й активно впливати на систему для її стабілізації чи покращення продуктивності.

Загалом, подальший розвиток цього методу спрямований на створення інтегрованих систем моніторингу, аналізу та керування, які забезпечують високий рівень автоматизації, точності прогнозів і адаптивності до сучасних кіберзагроз та умов швидко змінюваного середовища. Такі

рішення мають значний потенціал для застосування у сфері безпеки, промислових автоматизованих системах та розумних мережах IoT.

Експериментальна перевірка була проведена на даних з мережевих систем кіберзахисту, що включають журнали подій, параметри трафіку та лог-файли. В ході дослідження було встановлено, що запропоновані підходи забезпечують підвищення точності виявлення аномалій на 15–20% порівняно з традиційними методами [15, ст. 7].

Апробація результатів здійснювалася у міжкафедральній лабораторії Університету митної справи та фінансів на основі інформаційно-технічної системи WIFI MESH. Це дослідження проводилося в межах науково-дослідної роботи «Розробка бездротових інформаційно-технічних систем подвійного призначення з центральним сервером», № держрегістрації 0122U200580. Такий підхід дозволив перевірити ефективність розроблених методів у реальних умовах роботи мережевих систем, що сприяло підвищенню їх практичної цінності для забезпечення надійного та безперебійного функціонування інтернет-зв'язку в кризових ситуаціях.

Висновки. У дослідженні запропоновано та апробовано інноваційний підхід до моніторингу та управління станами інформаційно-технічних систем (ІТС) шляхом інтеграції графічної візуалізації та нейромережевих алгоритмів. На основі результатів експериментальних досліджень зроблено висновок, що запропонована модель формалізації станів інформаційно-технічних систем враховує динамічність, ієрархічність та нелінійність взаємодій між компонентами. Введення багатовимірних функцій стану та використання системи диференціальних рівнянь дозволяє описати складні взаємозв'язки між компонентами та їхню адаптивність до зовнішніх і внутрішніх змін. Використання графічної візуалізації як інструменту аналізу та оптимізації нейромережевих алгоритмів значно підвищує інформативність процесу моніторингу. Це сприяє виявленню прихованих закономірностей у багатовимірних даних, що є важливим для дослідження складних систем. Запропоновано підхід до автоматизації процесів виявлення аномалій та аналізу мережевого трафіку на основі інтеграції багатошарових персептронів, алгоритмів зворотного поширення помилки та методів факторизації матриць. Це дозволяє адаптувати методи до особливостей конкретних систем і забезпечити їхню універсальність. Використання графових нейронних мереж (Graph Neural Networks, GNN) для аналізу взаємозв'язків між компонентами системи відкриває нові можливості для розробки адаптивних механізмів керування складними структурами. Це дозволяє враховувати [8, ст. 2] динамічність зв'язків у реальному часі та підвищити ефективність роботи системи. Апробація підходів на даних мережевих систем кіберзахисту, таких як журнали подій, мережевий трафік та лог-файли, показала підвищення точності виявлення аномалій на 15–20% порівняно з традиційними методами. Це підтверджує можливість використання розроблених моделей у реальних умовах для забезпечення безпеки інформаційних систем [9, ст. 3; 10, ст. 6]. Проведення експериментальних досліджень у міжкафедральній лабораторії Університету митної справи та фінансів на базі системи WIFI MESH у рамках науково-дослідної роботи «Розробка теоретико-методологічних засад забезпечення безперервного інтернету в надзвичайних ситуаціях» продемонструвало практичну реалізацію розроблених підходів у державних інформаційних системах. У підсумку, запропоновані методи мають високий потенціал для подальшого розвитку, зокрема через удосконалення графічних моделей, інтеграцію з архітектурами графових нейронних мереж, застосування метаевристичних методів оптимізації та навчання з підкріпленням. Це дозволить створити інтегровані системи моніторингу, аналізу та керування, які забезпечують автоматизацію процесів, точність прогнозів та адаптивність до сучасних кіберзагроз і змінюваних умов середовища.

Список літератури:

1. Нгуєн Т.Т., Нгуєн Т.Д., Тран Н.Х., Хоанг Т.А. Глибинне навчання для кіберзагроз у програмно-визначених мережах // Future Generation Computer Systems. Elsevier, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.future.2020.05.008.

2. Гобаді М., Багерзаде Дж., Салехіан С. Машинне навчання для адаптивного виявлення загроз у хмарних системах // IEEE Access. IEEE, 2020. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2975746.

3. Хітон Дж. Вступ до математики нейронних мереж. Heaton Research, 2012.

4. Кінгслі Г., Кукієла Д. Нейронні мережі з нуля на Python. [Видавництво не вказано], 2020.

5. Тейлор М. Нейронні мережі: візуальне введення для початківців. Blue Windmill Media, 2017.

6. Рунгта К. TensorFlow за 1 день. Створіть власну нейронну мережу. Amazon Digital Services LLC – Kdp Print Us, 2018.

7. Граупе Д. Принципи штучних нейронних мереж. World Scientific Publishing Company, 2013.

8. Рашид Т. Створіть власну нейронну мережу. Createspace Independent Publishing Platform, 2016.

9. LazyProgrammer. Конволюційні нейронні мережі на Python: опануйте науку про дані та машинне навчання за допомогою сучасного глибинного навчання на Python, Theano та TensorFlow. LazyProgrammer. me, 2016.

10. Лернінг Дж.Х. Машинне навчання на Python: експрес-курс для початківців для розуміння машинного навчання, штучного інтелекту, нейронних мереж та глибинного навчання зі Scikit-Learn, TensorFlow та Keras. [Видавництво не вказано], 2019.

11. Цай С., Білескі С., Нільсен Е. Глибинне навчання на JavaScript: нейронні мережі у TensorFlow.js. Manning Publications, 2020.

12. Афрам А., Джанабі-Шаріфі Ф., Фунг А.С., Раахеміфар К. Модельне передбачувальне управління (MPC) та оптимізація систем HVAC на основі штучних нейронних мереж (ANN): огляд сучасного стану та приклад дослідження житлової системи HVAC // Energy and Buildings. Elsevier, 2017.

13. Размі Х. Адаптивне управління висотою польоту для квадрокоптера на основі нейронної мережі // Journal of Central South University. Springer, 2018.

14. Лі Ч., Ся І., Юаньцін С., Чунь-І Д., Джун Дж., Фу Дж., Хе В. Закон наведення ракет на основі оптимізації нейронної мережі за допомогою стійкого модельного передбачувального управління // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. IEEE, 2015.

15. Госкінс Дж.К., Хіммельблау Д.М. Управління процесами за допомогою штучних нейронних мереж і навчання з підкріпленням // Computers & Chemical Engineering. Elsevier, 1992.

16. Лю Ц. Управління ковзним режимом за допомогою MATLAB: управління ковзним режимом на основі нейронної мережі RBF. [Видавництво не вказано], 2017.

17. Рабо Ж., Кухта М., Єнсен А., Реглад У., Черарді Н. Штучні нейронні мережі, навчені за допомогою глибинного навчання з підкріпленням, відкривають стратегії управління для активного управління потоком // Journal of Fluid Mechanics. Cambridge University Press, 2019.

18. Ахмаді А., Кашефі М., Шахрохі Х., Хасан Н., Мохаммад А. Система комп'ютерної діагностики з використанням глибинних згорткових нейронних мереж для підтипів СДУГ // Biomedical Signal Processing and Control. Elsevier, 2021.

Prokopovych-Tkachenko D.I. GRAPHICAL VISUALIZATION AND NEURAL NETWORKALGORITHMS: INNOVATIVE APPROACHES TO MONITORING THE STATES OF INFORMATION SYSTEMS

The article presents an innovative approach to monitoring and managing the states of information-technical systems based on the use of graphical visualization and neural network algorithms. Graphical visualization enables an intuitive representation of dynamic system state changes, facilitating quick situation assessment and decision-making for stabilization. Integration with neural network models significantly enhances the accuracy of analysis, monitoring, and forecasting of system states, which is particularly relevant in the context of modern cybersecurity threats.

The proposed approach includes automation of anomaly detection, network traffic analysis, and potential threat prediction. The article provides a detailed description of the algorithm for training neural networks to interact with graphical visualization, enabling efficient processing of complex multidimensional data. The application of this approach has been tested on real data from state-level information-technical systems, including event logs, log files, and network traffic data.

The experimental results demonstrate that the implementation of graphical visualization and neural network algorithms reduces the number of false positives and ensures anomaly detection accuracy at a level of 95%, which is 20% higher than traditional methods. Additionally, graphical visualization significantly simplifies system management, allowing administrators to respond quickly to cybersecurity incidents or ensure automated problem-solving without human intervention.

The methodology is especially useful for state organizations facing high levels of cybersecurity threats. Integrating this approach into existing cybersecurity systems expands their functionality, enabling threat detection, risk prediction, and maintaining the stability of critical information systems. The prospects for applying this approach confirm its importance in creating highly reliable cybersecurity systems that meet the challenges of the modern information environment.

Key words: *information security, neural networks, graphical visualization, state analysis, anomaly detection, forecasting, cybersecurity.*

УДК 004.056.8
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/28

Прокопович-Ткаченко Д.І.
Університет митної справи та фінансів

Саричев В.І.
Університет митної справи та фінансів

Звєрєв В.П.
Державний торговельно-економічний університет

Бушков В.Г.
Державний торговельно-економічний університет

Хрушков Б.С.
Університет митної справи та фінансів

МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ ДЕРЖАВИ ЯК СКЛАДНОЇ ТЕХНОГЕННОЇ СИСТЕМИ: СТРАТЕГІЧНИЙ ПІДХІД ДО УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ

У статті розглянуто проблеми забезпечення інформаційної безпеки держави, яка є складною техногенною системою, що поєднує технічні, організаційні, інформаційні та людські компоненти, функціонуючи в умовах динамічного середовища та ризиків високих рівнів. Представлено системний підхід до моделювання інформаційної безпеки, який враховує її складну структуру, динамічність, адаптивність та багатофакторність. Розроблено концептуальну модель, що відображає основні ризики та шляхи їх мінімізації за допомогою стратегічного планування та управління. Модель базується на принципах системної динаміки, інтегрованого аналізу ризиків та адаптивного управління, що забезпечує її ефективність у сучасних умовах.

Особливу увагу приділено впливу людського фактору на функціонування системи інформаційної безпеки та необхідності врахування його ролі у досягненні кінцевих результатів. Запропоновані підходи спрямовані на оптимізацію управлінських процесів у різних сферах соціального та економічного життя, забезпечення надійності та стійкості системи, а також її здатності до адаптації відносно змін зовнішнього середовища. Використання розробленої моделі дозволяє державним установам та організаціям, бізнес-структурам зокрема вдосконалювати процеси прийняття рішень у сфері інформаційної безпеки, знижувати ризики та підвищувати ефективність заходів безпеки.

Провідними науковими методами моделювання, які доцільно використовувати для аналізу інформаційної безпеки, визначено: системну динаміку – що дозволяє вивчати взаємозв'язки між компонентами системи та моделювати їхню поведінку у відповідь на зміни зовнішнього середовища; а також мітаційне моделювання – яке використовується для оцінки ефективності різних сценаріїв реагування на загрози та оптимізації управлінських рішень.

Результати дослідження є вагомим внеском у розвиток теоретичних та практичних аспектів інформаційної безпеки, що є критично важливим для забезпечення сталого розвитку держави в умовах сучасних викликів, воєнного часу та наступного відновлювального періоду тощо.

Ключові слова: *інформаційна безпека, техногенні системи, системна динаміка, управління ризиками, стратегічне планування, адаптивність, моделювання.*

Постановка проблеми. Інформаційна безпека держави є фундаментальною складовою національної безпеки, забезпечуючи стабільне функціонування державних інституцій, національної економіки, захист критично важливих даних, інфраструктурних об'єктів та інформаційних систем. В умовах глобалізації, цифровізації суспільства та зростання масштабів кібератак традиційні підходи до забезпечення інформаційної безпеки виявляють обмежену ефективність.

Це зумовлює необхідність наукового переосмислення безпекових проблем, враховуючи їх багатовимірний, динамічний та технологічно залежний характер. Закони України «Про основи

національної безпеки України» та «Про захист інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах», наголошують на важливості системного підходу до забезпечення інформаційної безпеки та управління інформаційними ресурсами [1, с. 3–5; 2, с. 12].

Сучасні стратегії, зокрема Стратегія кібербезпеки України на 2021–2025 роки, визначають кібератаки та інформаційні загрози як ключові ризики для національної безпеки [3, с. 7]. Стратегія акцентує увагу на необхідності інтегрованого підходу до захисту інформаційного простору через використання наукових методів моделювання, системного аналізу ризиків та прогнозування. Ці положення створюють належне підґрунтя для розгляду інформаційної безпеки держави як складної динамічної системи, яка функціонує в умовах взаємодії технічних, організаційних, інформаційних та людських компонентів.

Запропонований системний підхід до моделювання інформаційної безпеки держави дозволяє врахувати вплив ключових компонентів, їх взаємозалежність, адаптивність до змін та динамічність наявних, а також прогнозованих у майбутньому ризиків. Зокрема, модель має інтегрувати аналіз взаємодії технічних та організаційних складових із соціальними факторами, включаючи вплив людського фактору.

Результати моделювання можуть використовуватися для оцінювання стану інформаційної безпеки, прогнозування можливих загроз та формування стратегій їх мінімізації у різних сферах суспільного життя. Науковий аналіз моделей інформаційної безпеки забезпечує стратегічну основу для впровадження інноваційних підходів до управління ризиками та підвищення ефективності управлінських рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед сучасних наукових досліджень, які розкривають сутність складних динамічних систем, слід відзначити роботу Доусона М. П. (2020). У книзі «Мислення в системах та ментальні моделі» підкреслено важливість системного підходу для вирішення складних проблем та прийняття рішень у багатокомпонентних системах. Ця робота є фундаментальною для розуміння системної інтеграції в управлінні інформаційною безпекою [4, с. 27].

Турнер С., Ганель Р., Клімек П. як співавтори у праці «Вступ до теорії складних систем» (2018) наголошують на важливості нелінійної динаміки та адаптивності у складних технічних і соціальних системах. Вони пропонують методології для аналізу взаємодій між компонентами системи, які можуть бути корисними для розробки стратегій інформаційної безпеки держави [5, с. 45, 68].

Ауянг С. Ю. у книзі «Основи теорій складних систем: У економіці, еволюційній біології та статистичній фізиці» (1999) розглядає міждисциплінарний підхід до дослідження складних систем. Її висновки застосовані для інтеграції підходів до управління інформаційною безпекою через аналіз складних технічних систем [6, с. 89, 120].

Маккі З. у праці «Мислення в системах: Теорія та практика стратегічного планування» (2018) пропонує прості інструменти для стратегічного управління, які можуть стати корисними у контексті інформаційної безпеки, дозволяючи уникнути типових помилок при моделюванні складних технічних систем [7, с. 18, 52].

Беттенкурт Л. М. у книзі «Вступ до науки про міста» (2021) акцентує увагу на містах як складних системах із багатошаровою взаємодією компонентів. Цей підхід може бути адаптований для аналізу критичної інфраструктури держави, яка також функціонує за принципами складних систем [8, с. 5, 33].

Гуастелло С. Дж., Купманс М., Пінкус Д. у праці «Хаос і складність у психології: Теорія нелінійних динамічних систем» (2009) пропонують інструменти для вивчення нелінійної поведінки систем, що є важливим для аналізу людського фактора у питаннях інформаційної безпеки [9, с. 14, 50].

Поряд з цим, Іванцевич В. Г. і Рід Д. Дж. у книзі «Складність і управління: До строгої поведінкової теорії складних динамічних систем» (2014) пропонують методи моделювання та управління складними технічними системами, що безпосередньо пов’язано з управлінням інформаційною безпекою держави [10, с. 8, 42].

Кіль Л. Д. і Елліот Е. В. у праці «Складні системи в соціальних і поведінкових науках» (2021) аналізують взаємодію компонентів у соціальних системах. Цей підхід може бути корисним для розуміння системної адаптивності у контексті інформаційної безпеки [11, с. 20, 55].

Берхаут Е., Фійтенман Р., Хендрікс Л., де Бур М. та Бутейн Б. у книзі «Аудит цифрових систем: Теорія і практика аудиту складних інформаційних систем і технологій» (2022) розглядають методології аудиту складних інформаційних систем. Їхній підхід дозволяє ефективно оцінювати ризики та вразливості, що є ключовим для забезпечення безпеки державних систем [12, с. 17, 35].

Раш В. та Вулф К. у праці «Спостереження за складністю: Теорія систем і постмодерн»

(2000) розкривають концептуальні основи складних систем і взаємодій. Цей теоретичний підхід може допомогти у розробці наукових підходів до захисту інформаційних систем [13, с. 6, 45].

Беннет А. та Беннет Д. у книзі «Організаційне виживання в новому світі» (2003) досліджують адаптивність складних систем і методи їхнього стійкого функціонування. Це дозволяє впроваджувати ефективні моделі управління у сфері інформаційної безпеки [14, с. 11, 28].

Отже, активний науковий інтерес безперечно свідчить про актуальність досліджуваної теми. Проте, невирішеними аспектами визначеної проблеми залишається реалізація системного підходу в аналізі інформаційної безпеки держави, яку доцільно розглядати як складну динамічну техногенну систему, а інтеграцію системного мислення, міждисциплінарних підходів та адаптивного управління, на цьому тлі, – ключем до підвищення захисту критичних інформаційних ресурсів.

Постановка завдання. Метою статті є визначення провідних чинників розв'язання проблем моделювання інформаційної безпеки України як складної динамічної системи, що дозволить визначити найвпливовіші фактори ризику, які впливають на її стійкість та ефективність, а головне завдання полягає у формуванні та вдосконаленні техногенних стратегій, спрямованих на забезпечення адаптивності, стійкості та надійності системи інформаційної безпеки у сучасних умовах глобальних викликів.

Поряд з цим, важливими завданнями дослідження, по-перше, є розробка концептуальної моделі інформаційної безпеки держави, яка враховує взаємодію технічних, організаційних, інформаційних та людських компонентів, а також ідентифікація ключових факторів ризику, які впливають на стійкість системи інформаційної безпеки, та оцінка їх впливу на динаміку системи.

По-друге, важливим завданням дослідження стала розробка техногенних стратегій управління ризиками, що забезпечують інтегровану стійкість системи до зовнішніх і внутрішніх загроз та визначення підходів до оптимізації управлінських рішень на рівні технологій та персоналу, спрямованих на мінімізацію ризиків, а також надання практичних рекомендацій для державних установ щодо впровадження інноваційних рішень у сфері інформаційної безпеки, які враховують динамічні та багатофакторні характеристики системи.

Для реалізації зазначених завдань передбачено проведення системного аналізу складових інформаційної безпеки, включаючи технічну інфраструктуру, організаційні процеси, інформаційні ресурси та людський фактор, а також використання методів системної динаміки для моделювання взаємодії ключових компонентів системи та прогнозування можливих сценаріїв розвитку ризиків.

До цього ж, зауважимо, що розробка інтегрованих підходів до управління ризиками передбачає застосування технологічних інновацій, налаштування адаптивного управління та створення дієвих алгоритмів вдосконалення навичок персоналу.

На такій основі стає можливим формування обґрунтованих рекомендацій для оптимізації процесів прийняття рішень у сфері інформаційної безпеки з урахуванням специфіки функціонування державних установ, суб'єктів господарювання всіх рівнів тощо. При цьому, очікувані результати дослідження передбачають створення ефективних інструментів для підвищення стійкості інформаційної безпеки України, що враховують складність і динамічність сучасного інформаційного простору.

Виклад основного матеріалу. Інформаційна безпека держави є складною динамічною технічною системою, яка включає в себе багаторівневу інтеграцію технічних, інформаційних, організаційних та людських компонентів для забезпечення захисту державного інформаційного простору від зовнішніх і внутрішніх загроз. Як і будь-яка складна техногенна система, інформаційна безпека має визначальні риси, що суттєво впливають на її ефективність і стійкість.

Однією з ключових рис є нелінійність, яка полягає у тому, що взаємодія між компонентами системи може створювати ефекти, які важко передбачити. Наприклад, вплив людського фактору в управлінні технічними засобами може призвести до появи нових ризиків. Це підтверджується дослідженнями, які підкреслюють важливість системного підходу до аналізу взаємозв'язків між компонентами [4, с. 12, 27].

Наступною важливою рисою є адаптивність, що проявляється у здатності системи до налаштування під впливом змін у зовнішньому середовищі. Дослідники наголошують, що адаптивність є ключовою умовою для стійкості систем в умовах невизначеності та зростаючих ризиків [7, с. 18, 52]. Цей підхід до адаптивного управління є особливо цінним для інформаційної безпеки, яка потребує постійного вдосконалення в умовах динамічної трансформації технологічного середовища.

Інформаційна безпека також є динамічною системою, що означає постійні зміни у її структурі та функціонуванні. Динамічні системи вима-

гають швидкої реакції на зміни, що є важливим для протидії новим кіберзагрозам та оптимізації управління інформаційними процесами.

Ще однією характерною рисою системи інформаційної безпеки є стохастичність, тобто наявність випадкових впливів, які ускладнюють прогнозування результатів і функціонування системи. Дослідження підкреслюють, що системи з високим рівнем стохастичності потребують ретельного управління ризиками та використання нелінійних моделей для оцінки можливих сценаріїв розвитку [9, с. 14, 50].

Для забезпечення ефективності інформаційної безпеки як складної техногенної системи важливо також враховувати суттєвий вплив людського фактору. Дослідники відзначають важливість інтеграції людських і технічних компонентів у процесах адаптивного управління ризиками, що є особливо актуальним у сфері інформаційної безпеки, де якість управлінських рішень залежить не лише від технологій, а й від компетентності персоналу, його соціально-психологічного стану, стресостійкості та конфліктності тощо [10, с. 8, 42].

Виходячи з цього, можна стверджувати, що система інформаційної безпеки держави повністю відповідає характеристикам складної динамічної технічної системи. Вона інтегрує технічні, організаційні, інформаційні та людські компоненти, взаємодія яких визначає її ефективність і стійкість. Висновки, зроблені на основі аналізу наукових робіт, підтверджують необхідність системного підходу до моделювання та управління інформаційною безпекою [6, с. 89, 120; 8, с. 5, 33; 13, с. 6, 45].

Загалом інформаційна безпека держави, будучи складною системою, потребує інтеграції системного мислення, адаптивного управління і багатофакторного аналізу, що дозволить забезпечити її надійність і стійкість у сучасному динамічному середовищі.

Інноваційні методи моделювання складних техногенних систем включаючи системи інформаційної безпеки відкривають нові можливості для ефективного управління їхньою динамікою, стійкістю та адаптивністю. Ці методи базуються на інтеграції сучасних технологій математичного моделювання та людського досвіду, що дозволяє враховувати багатофакторний характер таких систем.

Серед найбільш перспективних інноваційних підходів слід відзначити використання цифрових двійників. Цей метод передбачає створення інтегрованих цифрових моделей, які імітують функціонування реальних об'єктів. Цифрові двійники дозволяють тестувати сценарії розвитку подій, оцінювати ризики та знаходити оптимальні рішення без ризику для реальних систем.

Наприклад, такі моделі можуть бути використані для перевірки ефективності нових засобів захисту або виявлення вразливостей у державних інформаційних системах. Їх застосування є ключовим для підвищення стійкості та надійності системи в умовах динамічних загроз.

Поряд з цим, інтелектуальні алгоритми на основі штучного інтелекту та машинного навчання стають ще одним потужним інструментом моделювання складних систем. Вони дозволяють автоматизувати аналіз ризиків, виявляти патерни аномальної поведінки та пропонувати адаптивні стратегії реагування на загрози. Ці алгоритми мають особливу цінність для прогнозування та раннього виявлення кіберзагроз, що дозволяє оперативно реагувати на нові виклики.

Ще одним продуктивним підходом є експертні оцінки які використовуються для визначення слабких місць у системі. Хоча цей метод є менш автоматизованим, він залишається актуальним завдяки можливості врахування досвіду фахівців, які мають глибокі знання про специфіку функціонування техногенних систем. Залучення експертів дозволяє комбінувати інтуїтивне розуміння системних процесів із точністю математичних моделей.

Використання цих інноваційних методів дозволяє створювати гібридні моделі, які поєднують математичний аналіз, імітаційне моделювання та експертний підхід. Такий підхід забезпечує системний аналіз складних техногенних систем, включаючи інформаційну безпеку держави і дозволяє враховувати як технічні так і організаційні аспекти.

Інтеграція цифрових двійників штучного інтелекту та експертних оцінок сприяє підвищенню якості управлінських рішень адаптивності системи до змін зовнішнього середовища та ефективності заходів безпеки. Отже, впровадження інноваційних методів моделювання складних систем є важливим напрямом розвитку інформаційної безпеки, який дозволяє одночасно підвищувати її надійність стійкість та здатність до адаптації у відповідь на сучасні виклики.

Методи математичного та інноваційного моделювання, які можуть бути ефективно використані для аналізу інформаційної безпеки також застосовуються для моделювання інших складних техногенних систем держави. Їх використання дозволяє оцінювати функціонування цих систем, визначати ключові ризики, а також розробляти стратегії їхнього вдосконалення та підвищення стійкості.

Наприклад, у системі управління енергетичною безпекою застосування методів системної динаміки дозволяє моделювати взаємозв'язки між компонентами енергетичної системи, такими як: постачання, споживання, зберігання та резервування енергії.

Разом з цим, використання цифрових двійників допомагає прогнозувати наслідки технічних збоїв або атак на критичну інфраструктуру енергомережі, а інтелектуальні алгоритми забезпечують оптимізацію енергоспоживання та управління ризиками. Також цифрові двійники допомагають тестувати стратегії без реального ризику, а інтелектуальні алгоритми забезпечують автоматизацію прийняття рішень.

У системі забезпечення кібербезпеки критичної інфраструктури держави, яка включає транспортні мережі, водопостачання, зв'язок та фінансові установи, імітаційне моделювання використовується для тестування сценаріїв атак оцінки їхнього впливу на функціонування системи та перевірки ефективності заходів безпеки.

Паралельно значного функціонального значення набувають також методи мережевого аналізу, що допомагають визначити критичні вузли, які потребують посилення захисту. У системі реагування на надзвичайні ситуації, яка включає природні катастрофи, техногенні аварії та ін. кризи, використання таких методів як агентне моделювання дозволяє імітувати поведінку системи в умовах кризи, оцінювати можливі сценарії розвитку подій і розробляти оптимальні стратегії реагування.

У системі управління екологічною безпекою моделювання взаємодії між екологічними, технічними та соціальними компонентами є важливим для забезпечення стійкості екосистем та зменшення впливу техногенних факторів. Методи системної динаміки дозволяють прогнозувати наслідки забруднення зміни клімату чи інших екологічних загроз, а імітаційні моделі допомагають визначити ефективність заходів з мінімізації шкоди.

У системі охорони здоров'я в умовах пандемії можуть застосовуватися інтелектуальні алгоритми для прогнозування поширення захворювань, оцінки ефективності карантинних заходів і оптимізації розподілу медичних ресурсів. Імітаційні моделі допомагають оцінити можливі сценарії розвитку епідемії, а експертні оцінки доповнюють математичні розрахунки знаннями фахівців.

Таким чином методи моделювання складних техногенних систем є універсальними інструментами, які можуть бути адаптовані для аналізу та оптимізації функціонування різноманітних систем держави. Їх застосування забезпечує можливість не лише оцінювати поточний стан систем, але й прогнозувати їхню поведінку за різних умов, розробляти ефективні стратегії управління та мінімізувати ризики у сучасному мінливому середовищі.

Для аналізу інформаційної безпеки держави як складної технічної системи у дослідженні обрано системно-динамічну модель на основі методу наукового аналізу. Цей метод дозволяє всебічно оцінити взаємодію численних факторів, що впливають на інформаційну безпеку, враховуючи її динаміку, нелінійність, зворотні зв'язки та еволюцію у часі. Вибір цієї моделі був обґрунтований через її здатність формалізувати комплексні процеси, інтегрувати різнорідні аспекти, а також прогнозувати сценарії розвитку ситуацій.

При цьому, перш за все зауважимо, що саме нормативна база України вимагає врахування багатовимірності інформаційної безпеки. Закон України «Про основи національної безпеки України» [1, с. 351] визначає забезпечення інформаційної безпеки як один із пріоритетів державної політики. Закон України «Про захист інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах» [2, с. 286] підкреслює важливість технічного і організаційного захисту інформаційних систем, що передбачає моделювання їхньої роботи як складних систем. Крім того, у Стратегії кібербезпеки України на 2021–2025 роки [3, с. 7–16] акцентується увага на важливості комплексного підходу до аналізу ризиків і прогнозування загроз, що підтверджує доцільність застосування системного підходу.

З теоретичної точки зору, системно-динамічна модель дозволяє враховувати складну взаємодію між елементами системи і зовнішніми факторами. Як зазначає, приміром, Доусон М. П. [4, с. 11], системне мислення допомагає розуміти нелінійні динамічні процеси та ухвалювати стратегічні рішення. Турнер С. та його співавтори [5, с. 18] підкреслюють, що складні системи, зокрема інформаційні, потребують моделювання із врахуванням емерджентних властивостей, а Ауянг С. Ю. [6, с. 22] акцентує увагу на необхідності адаптивного управління такими системами.

Крім того, системно-динамічний підхід дозволяє формалізувати взаємозв'язки між компонентами інформаційної безпеки та здійснювати кількісний аналіз. Маккі З. [7, с. 9] зазначає, що саме системно-динамічні моделі є найкращими для стратегічного планування та вирішення проблем,

що виникають у складних адаптивних системах. Це підтверджує і Беттенкурт Л. М. А., який досліджував складність урбаністичних систем, подібних за структурою до інформаційних [8, с. 14].

Отже, порівнюючи системно-динамічну модель з іншими підходами, варто зазначити, що агентно-орієнтовані моделі [9, с. 12] ефективні для аналізу окремих суб'єктів системи, але не враховують загальну динаміку. Моделі ризик-менеджменту, як стверджує Іванцевич В. Г. [10, с. 8], фокусуються на оцінці ризиків, проте ігнорують складні взаємозв'язки між ними. Натомість системно-динамічні моделі, за словами Кіля Л. Д. [11, с. 5], є більш універсальними і здатні враховувати всі аспекти поведінки складної системи.

Інформаційна безпека держави є складною багатокомпонентною системою, яка охоплює технічну інфраструктуру, організаційні процеси, інформаційні ресурси, людський фактор та взаємодію із зовнішніми загрозами. Схема демонструє модель інформаційної безпеки держави як складної динамічної системи, розробленої на основі системно-динамічного підходу. Метою такої моделі є виявлення ключових компонентів системи, аналіз їх взаємодії та оцінка впливу зовнішніх і внутрішніх факторів на її стійкість. Система побудована так, щоб забезпечувати адаптивність, інтегрованість і здатність до ефективного реагування на загрози.

Таким чином, на основі аналізу нормативної бази, теоретичних досліджень та порівняння з іншими підходами, ми дійшли висновку, що системно-динамічна модель є найбільш ефективною для аналізу інформаційної безпеки держави. Вона дозволяє враховувати складність, адаптивність і взаємозалежність компонентів системи, що забезпечує надійність у прогнозуванні і прийнятті рішень (рис. 1). Представлена візуалізація є не лише інструментом аналізу поточного стану інформаційної безпеки, але й методологічною основою для розробки стратегій управління ризиками та вдосконалення управлінських процесів.

Система інформаційної безпеки держави складається з кількох ключових компонентів, кожен із яких виконує важливу роль у забезпеченні її стійкості та ефективності.

По-перше, технічна інфраструктура включає сервери, мережі зв'язку, системи захисту та

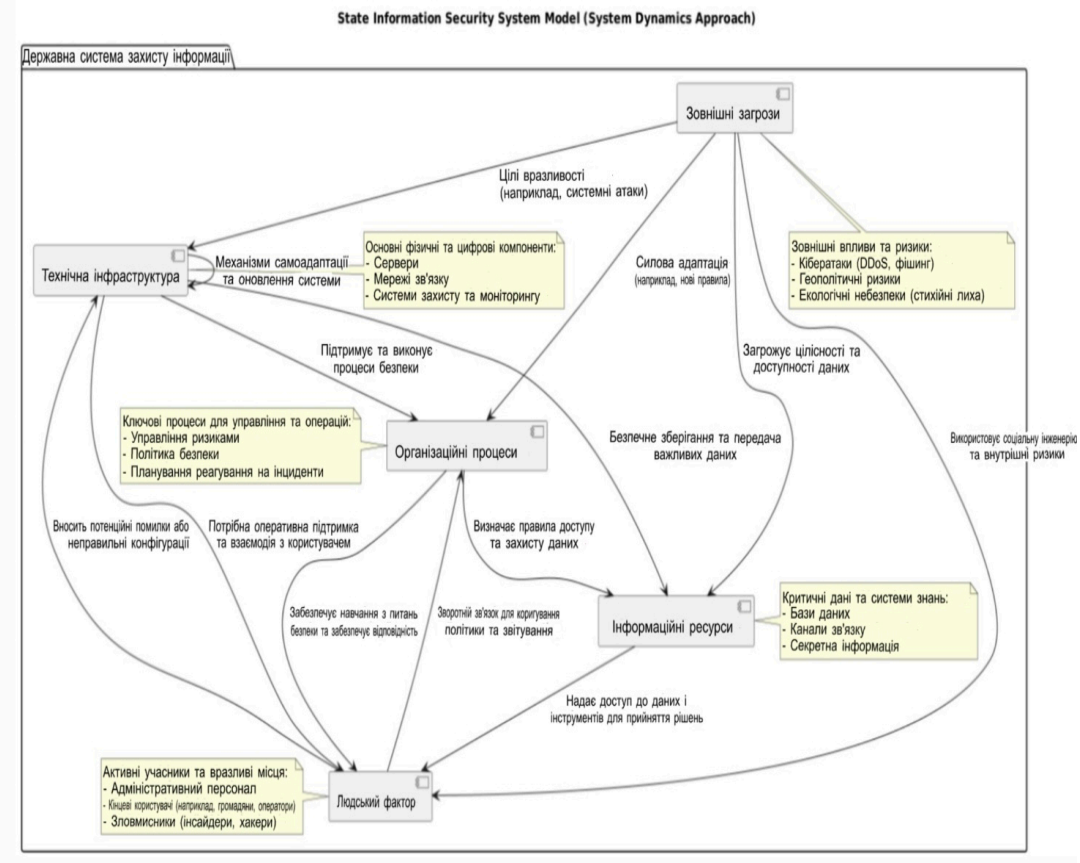


Рис. 1. Взаємозв'язок провідних складових системно-динамічної моделі аналізу інформаційної безпеки держави

Джерело: складено авторами.

моніторингу, які забезпечують стабільну роботу інформаційних процесів. Вона виконує основну функцію захисту даних та систем, а також має вбудовані механізми самодіагностики та оновлення, що дозволяють оперативно реагувати на зміни у технологічному середовищі або нові загрози.

По-друге, організаційні процеси пов'язані з стратегічним управлінням, яке охоплює ризик-менеджмент, формування політик та планування реагування на інциденти. Вони забезпечують інтеграцію технічної інфраструктури та людського фактору через навчання персоналу, контроль дотримання правил безпеки та вдосконалення процедур.

По-третє, інформаційні ресурси є критично важливими даними, які включають бази даних, канали зв'язку та інформацію з обмеженим доступом. Вони потребують забезпечення належного рівня доступу, безпечного зберігання та захисту від несанкціонованого втручання.

По-четверте, людський фактор відіграє ключову роль у функціонуванні системи, включаючи діяльність персоналу, поведінку кінцевих користувачів та наміри потенційних зловмисників. Він може бути джерелом ризиків, таких як помилкові дії, недотримання вимог внутрішньо-організаційних політик або атаки через соціальну інженерію, але також є важливим елементом управління системою.

Та, по-п'яте, зовнішні загрози, включаючи кібератаки, геополітичні ризики різної спрямованості чи екологічні небезпеки, створюють постійний тиск на систему, змушуючи її адаптуватися до нових умов.

При цьому, усі компоненти системи взаємопов'язані. Технічна інфраструктура підтримує організаційні процеси та інформаційні ресурси, забезпечуючи їхню функціональність. Організаційні процеси формують політики доступу до даних, стандарти взаємодії персоналу із системою та управляють ризиками. Людський фактор взаємодіє з усіма компонентами, забезпечуючи їхню роботу, виконання політик та реагування на загрози. Зовнішні загрози впливають на всі рівні системи, зокрема через технічні атаки, соціальну інженерію та організаційний вплив.

Отже, система має кілька унікальних рис, які роблять її ефективною у сучасних умовах. Вона є адаптивною, тобто здатною динамічно реагувати на зовнішні впливи та внутрішні зміни. Системна інтеграція забезпечує комплексну взаємодію між усіма її компонентами.

Проактивність дозволяє системі прогнозувати загрози та заздалегідь планувати дії для мінімізації ризиків. Усе це робить її стійкою та надійною в умовах сучасних викликів. Ця модель надає чітке уявлення про структуру, взаємозв'язки та механізми функціонування державної системи інформаційної безпеки. Вона є основою для подальшого впровадження стратегічних рішень, що підвищують стійкість державних інформаційних систем до сучасних викликів.

Висновки. Інформаційну безпеку держави слід розглядати як складну динамічну технічну систему, що об'єднує технічні, інформаційні, організаційні та людські компоненти для забезпечення захисту інформаційного простору від зовнішніх і внутрішніх загроз.

Її функціонування визначається такими характеристиками, як нелінійність, адаптивність, динамічність і стохастичність, що створює передумови для використання наукового математичного моделювання для її подальшого аналізу та вдосконалення.

Нелінійність системи відображає складність взаємодії між її компонентами, які можуть призводити до непередбачуваних наслідків. Це вимагає застосування системного підходу для вивчення її структури та поведінки. Адаптивність забезпечує здатність системи реагувати на нові виклики, що є особливо важливим в умовах динамічних кіберзагроз. Динамічність вказує на постійні зміни у системі, пов'язані із впровадженням нових технологій та появою нових загроз, а стохастичність підкреслює важливість врахування випадкових факторів і сценаріїв.

Наукові методи моделювання, які доцільно використовувати для аналізу інформаційної безпеки, включають:

1. Системну динаміку – метод, що дозволяє вивчати взаємозв'язки між компонентами системи та моделювати їхню поведінку у відповідь на зміни зовнішнього середовища.

2. Імітаційне моделювання, яке використовується для оцінки ефективності різних сценаріїв реагування на загрози та оптимізації управлінських рішень.

3. Методи мережевого аналізу, які дозволяють оцінити критичні вузли системи, їхній вплив на загальну стійкість та ефективність функціонування.

4. Цифрові двійники – інтегровані моделі, що імітують реальні системи, дають змогу проводити експерименти з метою тестування ефективності стратегій управління ризиками.

5. Інтелектуальні алгоритми, які базуються на штучному інтелекті, дозволяють аналізувати

ризики, прогнозувати загрози та автоматизувати управління.

6. Експертні оцінки – метод, що доповнює математичні моделі досвідом фахівців для визначення слабких місць системи.

Завдяки цим методам можна створювати багатофакторні моделі, які враховують технічні, організаційні та соціальні аспекти системи. Це дозволяє не лише досліджувати її функціонування, але й формувати ефективні стратегії для підвищення її стійкості. Інтеграція цифрових двійників, інтелектуальних алгоритмів та методів системної динаміки забезпечує поєднання теоретичного аналізу та практичних заходів.

У подальшому наукове математичне моделювання інформаційної безпеки держави стає не лише можливим, але й необхідним для її постійного вдосконалення. Застосування оновлених інноваційних методів моделювання відкриває можливості для визначення пріоритетних стратегій її підвищення, зокрема шляхом впровадження сучасних технологій, адаптивного управління ризиками та розвитку системного підходу до управління. Це у перспективі буде здатне забезпечити надійність, адаптивність і стійкість системи інформаційної безпеки в умовах як сучасних, так і майбутніх викликів.

Список літератури:

1. Закон України «Про основи національної безпеки України» від 19 червня 2003 року № 964-IV // *Відомості Верховної Ради України.* 2003. № 39. С. 351.

2. Закон України «Про захист інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах» від 5 липня 1994 року № 80/94-ВР // *Відомості Верховної Ради України.* 1994. № 31. С. 286.

3. Стратегія кібербезпеки України на 2021–2025 роки, затверджена рішенням РНБО України від 14 травня 2021 року, введена в дію Указом Президента України від 26 серпня 2021 року № 447/2021 // *Офіційний вісник Президента України.* 2021. № 20. С. 7–16.

4. Доусон М. П. Мислення в системах та ментальні моделі: Як мислити як супер-мислитель. Керівництво з мистецтва ухвалення рішень і вирішення складних проблем. Теорія хаосу, наука про мислення для соціальних змін / М. П. Доусон. 2020. 184 с.

5. Турнер С., Ганель Р., Клімек П. Вступ до теорії складних систем / С. Турнер, Р. Ганель, П. Клімек. Оксфордське університетське видавництво, США, 2018. 240 с.

6. Ауянг С. Ю. Основи теорій складних систем: У економіці, еволюційній біології та статистичній фізиці / С. Ю. Ауянг. – Кембриджське університетське видавництво, 1999. 320 с.

7. Маккі З. Мислення в системах: Теорія та практика стратегічного планування, вирішення проблем та створення тривалих результатів – простота складності / З. Маккі. *CreateSpace Independent Publishing Platform,* 2018. URL: https://vcf.vn.ua/sposib-piznannya-rozvinuti-logichne-mislennya/ (дата звернення: 10.12.2024).

8. Беттенкурт Л. М. А. Вступ до науки про міста: Докази та теорія міст як складних систем / Л. М. А. Беттенкурт. MIT Press, 2021. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/50988/1/Metody_modeliuvannia.pdf (дата звернення: 10.12.2024).

9. Гуастелло С. Дж., Купманс М., Пінкус Д. Хаос і складність у психології: Теорія нелінійних динамічних систем / С. Дж. Гуастелло, М. Купманс, Д. Пінкус. Кембриджське університетське видавництво, 2009. URL: https://www.yakaboo.ua/ua/mistectvo-misliti-sistemno-rozv-jazannja-problem-vid-osobistogo-do-globalnogo-masshtabu.html (дата звернення: 10.12.2024).

10. Іванцевич В. Г., Рід Д. Дж. Складність і управління: До строгої поведінкової теорії складних динамічних систем / В. Г. Іванцевич, Д. Дж. Рід. – World Scientific Publishing Co., 2014. URL: https://khai.edu/assets/files/ robochi-programi/124/sistemnij-analiz/rp_b_124_modelyuvannya-skladnih-sistem-z-kr.pdf (дата звернення: 10.12.2024).

11. Кіль Л. Д., Елліот Е. В. Складні системи в соціальних і поведінкових науках: Теорія, метод і застосування / Л. Д. Кіль, Е. В. Елліот. Мічиганське університетське видавництво, 2021. URL: https://hub.kyivstar.ua/ reviews/mistecztvo-sistemnogo-mislennya (дата звернення: 10.12.2024).

12. Берхаут Е., Фійтенман Р., Хендрікс Л., де Бур М., Бутейн Б. Аудит цифрових систем: Теорія і практика аудиту складних інформаційних систем і технологій / Е. Берхаут, Р. Фійтенман, Л. Хендрікс, М. де Бур, Б. Бутейн. Springer, 2022. URL: https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-57530-3 (дата звернення: 10.12.2024).

13. Раш В., Вулф К. Спостереження за складністю: Теорія систем і постмодерн / В. Раш, К. Вулф. Видавництво Університету Міннесоти, 2000. URL: https://www.upress.umn.edu/book-division/books/observing-complexity (дата звернення: 10.12.2024).

14. Беннет А., Беннет Д. Організаційне виживання в новому світі: Розумна складно-адаптивна система / А. Беннет, Д. Беннет. Butterworth-Heinemann, 2003. URL: https://www.elsevier.com/books/ organizationalsurvival-in-the-new-world/bennett/9780750677121 (дата звернення: 10.12.2024).

Prokopovych-Tkachenko D.I., Sarychev V.I., Zvieriev V.P., Khruskov B.S., Bushkov V.G.

MODELING STATE INFORMATION SECURITY AS A COMPLEX TECHNOLOGICAL SYSTEM: A STRATEGIC APPROACH TO RISK MANAGEMENT

The article addresses the issues of ensuring the information security of the state, which is a complex technogenic system combining technical, organizational, informational, and human components, operating in a dynamic environment and under high-level risks. A systematic approach to modeling information security is presented, taking into account its complex structure, dynamism, adaptability, and multifactorial nature. A conceptual model has been developed, reflecting the main risks and ways to minimize them through strategic planning and management. The model is based on the principles of system dynamics, integrated risk analysis, and adaptive management, ensuring its effectiveness under modern conditions.

Special attention is given to the influence of the human factor on the functioning of the information security system and the need to consider its role in achieving final results. The proposed approaches aim to optimize management processes in various spheres of social and economic life, ensure the reliability and resilience of the system, and its ability to adapt to changes in the external environment. The application of the developed model allows state institutions and organizations, including business structures, to improve decision-making processes in the field of information security, reduce risks, and enhance the effectiveness of security measures.

The leading scientific modeling methods that are appropriate for analyzing information security include: system dynamics, which enables the study of interconnections between system components and modeling their behavior in response to changes in the external environment; and scenario-based modeling, used to assess the effectiveness of different threat response scenarios and optimize managerial decisions.

The research results make a significant contribution to the development of theoretical and practical aspects of information security, which is critically important for ensuring the sustainable development of the state in the context of modern challenges, wartime, and the subsequent recovery period, among others.

Key words: *information security, technogenic systems, system dynamics, risk management, strategic planning, adaptability, modeling.*

УДК 004.67:004.62
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/29

Рудницький П.Є.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МЕТОД СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ ЗАХИЩЕНОГО ЕЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБІГУ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ БЛОКЧЕЙН

У статті представлено метод розробки систем захищеного електронного документообігу, розроблених на основі технології блокчейн, з акцентом на забезпеченні конфіденційності, цілісності та доступності цифрових документів. Проведено детальний аналіз існуючих рішень у цій галузі, виявлено їхні основні недоліки, такі як вразливість сторонніх сховищ, обмежена масштабованість та складність управління доступом. Особливу увагу приділено порівнянню підходів до зберігання даних з використанням популярних підходів таки як: on-chain і off-chain, а також їхніх переваг і обмежень в контексті несанкціонованого доступу, швидкодії, вартості та рівню масштабування.

Запропонована модифікація включає гібридну архітектуру, що використовує зберігання конфіденційної інформації на блокчейні та захищене off-chain зберігання самих документів із додатковим шифруванням. Впроваджено динамічне генерування хеш-ключів на основі алгоритму Proof of Work, що дозволяє значно підвищити стійкість до атак: навіть мінімальна фальсифікація даних призводить до зміни ключа, що теоретично унеможливлює його підробку. Крім того, система забезпечує перевірку автентичності документів через Open Time Stamp, що підвищує рівень захисту та цілісності файлів у режимі реального часу.

Розглянуті підходи до захисту цифрових документів демонструють перспективність застосування блокчейн технологій у різних галузях, де необхідний високий рівень безпеки та надійності даних, таких як фінанси, медицина та державний сектор. Дослідження пропонує метод модифікації Off-chain підходу проєктування подібних систем, задля усунення ключових недоліків, що в свою чергу підвищує рівень масштабованості, надійності та захищеності в умовах сучасних кіберзагроз.

Ключові слова: *захищений електронний документообіг, динамічне генерування хеш-ключів, Proof of Work, Blockchain, Off-chain, захист конфіденційної інформації.*

Постановка проблеми. Сучасні системи електронного документообігу є одним з ключових елементів цифрової трансформації, яка активно впроваджується в різних галузях, зокрема в бізнесі, державному управлінні та інших сферах. Однак, попри численні переваги таких систем, вони супроводжуються низкою викликів, серед яких загрози безпеки даних, питання автентифікації користувачів, перевірки достовірності документів та забезпечення їх незмінності. Ці проблеми часто призводять до витоку конфіденційної інформації, несанкціонованого доступу та підробок документів.

Одним з перспективних підходів до вирішення вищезазначених загроз є використання блокчейн-технології. Вона забезпечує можливість створення децентралізованих систем, де дані зберігаються у вигляді незмінних блоків, об'єднаних у послідовний ланцюг. Кожен блок містить криптографічний хеш попереднього, що гарантує цілісність та незмінність інформації: будь-яка зміна даних в одному блоці порушує всю структуру, роблячи підробку неможливою. Блокчейн також дає змогу прозоро відстежувати всі операції з документами, що впроваджує високий рівень безпеки та довіри серед користувачів.

Проте, незважаючи на очевидні переваги, поточні підходи до використання даної технології в контексті захисту цифрових документів мають низку обмежень. Перш за все, зростання кількості документів призводить до значного збільшення розміру блокчейну, що знижує швидкодію, підвищує вимоги до обчислювальних ресурсів та значно збільшує собівартість розробки та підтримки системи в цілому. Крім того, обмежена конфіденційність даних у відкритих блокчейн-системах викликає труднощі з забезпеченням захисту особистих та комерційних документів, оскільки всі учасники мають доступ до інформації . Існує також проблема складності управління криптографічними ключами, що вимагає додаткових заходів безпеки та надійного контролю доступу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні методи проектування систем дозволяють

зберігати дані як всередині блокчейну (on-chain), так і поза ним (off-chain), кожен підхід має свої переваги та обмеження. Вибір між on-chain і off-chain зберіганням залежить від вимог до безпеки, конфіденційності, продуктивності та обсягу даних. Розглянемо детальніше кожен із цих підходів, їхні переваги та недоліки.

On-chain зберігання передбачає, що всі дані записуються безпосередньо в блокчейні, що забезпечує їхню повну децентралізацію та незмінність. Це означає, що інформація доступна всім учасникам мережі та підлягає перевірці.

Переваги on-chain зберігання:

– *Незмінність*: дані, записані в блокчейні, не можуть бути змінені або видалені без зміни всієї структури блокчейну, що забезпечує їхню цілісність і автентичність [1].

– *Прозорість*: усі учасники мають доступ до даних, що підвищує рівень довіри та забезпечує відкритий доступ до інформації [2].

– *Безпека*: блокчейн-система забезпечує високий рівень захисту від зовнішніх втручань завдяки децентралізації та криптографічним методам [2].

Недоліки on-chain зберігання:

– *Масштабованість*: зростання обсягу даних на блокчейні значно уповільнює його роботу та збільшує обчислювальні витрати, що обмежує застосування on-chain зберігання для великих обсягів даних [3].

– *Конфіденційність*: у відкритих блокчейнах усі дані є доступними для всіх учасників, що ускладнює захист конфіденційної інформації, навіть при використанні шифрування [4].

– *Витрати*: зберігання великих обсягів даних на блокчейні може бути вкрай дорогим, оскільки кожен вузол зберігає повну копію блокчейну [5].

Приклади використання on-chain зберігання

Деякі проєкти використовують on-chain зберігання для невеликих обсягів критично важливих даних, таких як фінансові транзакції або дані для відстеження ланцюгів поставок, де важлива прозорість і незмінність записів [5].

Off-chain зберігання передбачає, що самі документи або великі обсяги даних зберігаються поза блокчейном, тоді як у блокчейні зберігаються лише контрольні значення або посилання на ці дані, що дозволяє зберігати великий обсяг інформації без суттєвого впливу на продуктивність блокчейну.

Переваги off-chain зберігання:

– *Масштабованість*: оскільки великі дані зберігаються поза блокчейном, це дозволяє значно зменшити навантаження на блокчейн і підвищити його продуктивність [2].

– *Конфіденційність*: off-chain сховища можна захистити додатковими методами шифрування, що підвищує рівень конфіденційності даних, які не призначені для широкого доступу [6].

– *Зменшення витрат*: зберігання даних поза блокчейном значно знижує витрати на обслуговування, особливо у випадку великих масивів інформації [4].

Недоліки off-chain зберігання:

1. *Залежність від зовнішніх сховищ*: якщо зовнішнє сховище стає недоступним або скомпрометованим, це може призвести до втрати доступу до даних або їх компрометації, що негативно впливає на загальну цілісність системи [5].

2. *Втрата децентралізації*: дані в off-chain сховищах не є частиною децентралізованого ланцюга блоків, що знижує рівень надійності та прозорості [2].

3. *Складність у забезпеченні цілісності*: для перевірки цілісності документів на основі контрольних хешів потрібні додаткові обчислення та механізми контролю, які не завжди ефективні у великих масштабах [7].

Приклади використання off-chain зберігання

Off-chain зберігання часто використовується для систем документообігу, де самі документи зберігаються у захищених зовнішніх базах даних, а на блокчейні записуються лише контрольні хеші документів для їх верифікації [8].

У відповідь на обмеження on-chain і off-chain підходів було розроблено *гібридні рішення*, що поєднують переваги обох методів. Наприклад, у роботі [2] пропонується модель, яка зберігає хеші або посилання на документи on-chain, тоді як самі документи зберігаються off-chain із додатковим шифруванням для забезпечення конфіденційності та доступності. Цей підхід дозволяє зберегти продуктивність і масштабованість системи, не жертвуючи прозорістю та безпекою даних.

Переваги гібридних рішень:

1. *Баланс масштабованості та безпеки:* використання off-chain для великих даних і on-chain для критично важливих метаданих дозволяє підвищити продуктивність і знизити витрати.

2. *Покращений захист даних*: шифрування off-chain даних і зберігання контрольних хешів on-chain забезпечує високий рівень конфіденційності та захисту від компрометації [7].

3. *Зручність перевірки цілісності*: контрольні хеші на блокчейні дозволяють легко перевірити автентичність і цілісність off-chain даних, що є критично важливим для систем електронного документообігу [8].

Недоліки гібридних рішень:

1. *Складність реалізації*: розробка та підтримка гібридної системи вимагає комплексних знань та обчислювальних ресурсів для забезпечення синхронізації між on-chain і off-chain даними [9].

2. *Витрати на обслуговування:* навіть за умови оптимізації, гібридні системи потребують високого рівня обслуговування для підтримки конфіденційності та доступності даних [10].

Приклади використання гібридних рішень

Гібридні рішення все частіше застосовуються у фінансових системах та великих організаціях, де потрібна прозорість транзакцій у поєднанні з конфіденційністю інформації.

Проаналізувавши вищезазначені підходи, можна побачити, що основною проблемою повністю децентралізованих систем є збільшення блокчейн частини, що в свою чергу значно підвищує собівартість розробки та підтримки усієї системи. У випадку з Off-chain підходом, збільшується ризик неавторизованого доступу до зовнішніх баз даних, і, як наслідок, витоку інформації. Якщо ж розглядати гібридні рішення, то складність реалізації та підтримки системи вцілому стає зависокою, і може бути невигідною та неефективною, для застосування в малих компаніях.

Постановка завдання. Метою даної статті є аналіз існуючих підходів до використання блокчейну в системах захисту цифрових документів, виявлення основних недоліків і розробка покращеного рішення, яке підвищує рівень захисту даних.

Запропонований підхід передбачає комбінування блокчейн-технології з off-chain зберіганням, що дозволяє зберігати великі обсяги даних поза основним ланцюгом блоків, забезпечуючи їхню конфіденційність і ефективність обробки. Також, застосування механізму динамічного генерування хеш-ключа доступу, дозволить впровадити додатковий шар захисту до системи вцілому та знизить ризик компрометації конфіденційних даних у випадку неавторизовного доступу до зовнішнього джерела зберігання даних.

Виклад основного матеріалу. Сфокусуємось на вищезгаданому підході проєктування подібних систем, а саме – Off-chain, оскільки, наразі, він є одним з найоптимальніших підходів, для вирішення поставленої задачі. Як вже зазначалось, даний метод має ряд переваг, у порівнянні з іншими, проте суттєвим недоліком є ризик компрометації конфіденційних даних, в разі неавторизованого доступу до стороннього джерела зберігання даних.

Задля мінімізації подібних ризиків, пропонується модифікація даного підходу наступним чином: впровадження механізму динамічного доступу до інформації між децентралізованою та сторонньою базами даних, за допомогою генерації хеш-ключа «на льоту».

Однією з основних переваг, такого рішення є стирання прямого статичного зв'язку між екземплярами документу та інформації про нього. Блокчейн-система тут буде використана в якості джерела істинності інформації, і слугуватиме для підтвердження та автентифікації дій таких як додавання файлу, зміни доступів, збереження інформації про власника і так далі. Як наслідок, подібна архітектура суттєво збільшує ентропію між даними.

Також, варто зазначити, що ключ доступу генерується за допомогою власного алгоритму Proof of Work та алгоритмів хешування таких як SHA-256 та SHA-3. Процес хешування є одностороннім і завжди має на виході єдиний результат, на однаковому наборі даних. Аналізуючи ці властивості, можна стверджувати, що навіть при незна-

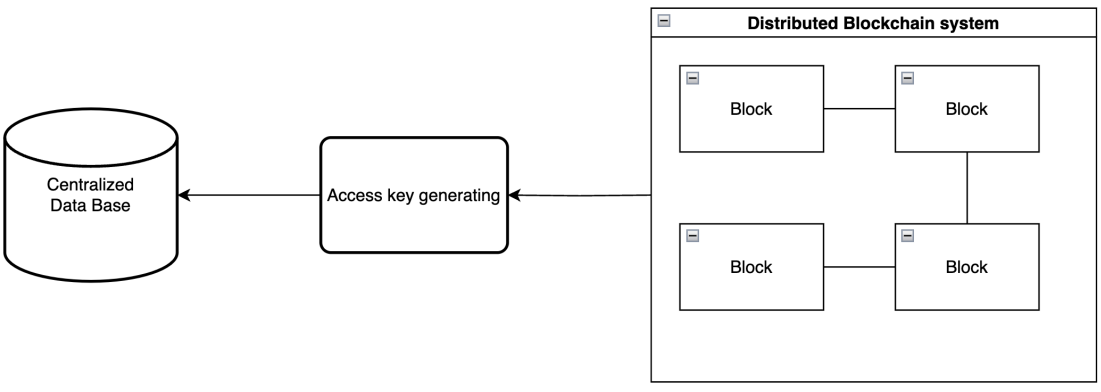


Рис. 1. Архітектура модифікованого підходу на базі Off-chain

чній фальсифікації даних в блоці, буде неможливо згенерувати валідний ключ доступу до відповідного документу.

Вищезгаданий алгоритм працює таким чином: підбираються хеш-ключі з унікальними вхідними даними до того моменту, поки не отримаємо визначену кількість нулів на початку. Для ускладнення задачі, маємо додатковий лічильник всередині циклу, який слугує для визначення чергового nonce. Тобто на кожній ітерації циклу, лічильник інкрементується та розбивається на рядок символів, з якого формується нове число, шляхом конвертування кожної цифри до її ASCII коду.

Наступним етапом є подвійне хешування за допомогою алгоритмів SHA3 та SHA256. Воно дає змогу підвищити складність генерування ключа і, як наслідок, зловмиснику доведеться обходити вже не один, а декілька алгоритмів хешування.

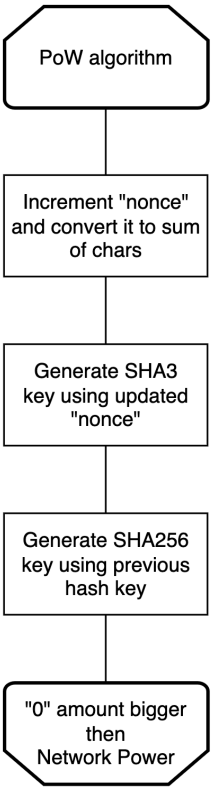


Рис. 2. Схема роботи алгоритму Proof of Work

Приймемо до уваги, що алгоритми SHA3-256 та SHA256 генерують хеш-ключ довжиною 256 бітів, а отже 64 шістнадцяткових знаки, кожен з яких представляє 4 біти і може мати значення від 0 до 15.

В найгіршому випадку, кількість ітерацій циклу може сягати $16^{64} = 2^{256}$ разів, в найкращому – 1 раз.

Введемо такі позначення:

x – кількість ітерацій циклу, де $1 < x < 2^{256}$

A – кількість нулів на початку хеш-ключа

B – кількість можливих знаків, на одному місці. Оскільки обчислення проводяться в шістнадцятковій системі, це число завжди дорівнюватиме 16

P – ймовірність випадкового підбору nonce

N – потужність мережі

Загальна формула для визначення ймовірності випадкового підбору nonce, і як наслідок, компрометації хеш-ключа матиме такий вигляд:

$$P(A) = \frac{B^{\log_B(x_{max})-A}}{X_{max}} = \frac{16^{\log_{16}(16^{64})-A}}{16^{64}} = \frac{16^{64-A}}{16^{64}} \quad (1)$$

Таблиця 1

Ймовірність компрометації хеш-ключа

N – потужність	A – кількість нулів	B – кількість знаків	P – ймовірність
10	1	16	16^{-1}
100	2	16	16^{-2}
1000	3	16	16^{-3}
10000	4	16	16^{-4}
100000	5	16	16^{-5}

Провівши аналіз роботи даного алгоритму, можна зробити висновок, що він має досить високий рівень захищеності від зовнішніх атак. На практиці, майже неможливо виконати випадковий підбір даних та згенерувати валідний ключ доступу, не знаючи принципу його роботи.

Для перевірки автентичності самого документу, пропонується використовувати Open Time Stamp – стандарт таймштампів в блокчейн екосистемі, який дозволяє генерувати унікальне значення для файлу, використовуючи його бінарне представлення, метадані та поточну дату створення.

При успішному знаходженні екземпляру документу в базі даних, проводитиметься також перевірка вищезазначеним стандартом, що в свою чергу унеможливлює фальсифікацію.

Нижче наведено блок-схему кінцевого алгоритму отримання документу з системи.

Кінцевий алгоритм працює таким чином: до системи надходить відповідний запит на отримання документу з UUID пов'язаного блоку в блокчейн-системі. Якщо такий блок існує, перевіряється право власності документу або ж право на користування ним. У разі успішної перевірки, динамічно обчислюється хеш-ключ доступу до бінарного представлення документу, з використанням алгоритму Proof of Work. Якщо документ з таким ключем існує, перевіряємо його автентичність за допомогою стандарту Open Time Stamps. У разі успішної перевірки, інформація з блоку поєднується з самим документом і стає доступною кінцевому користувачу.

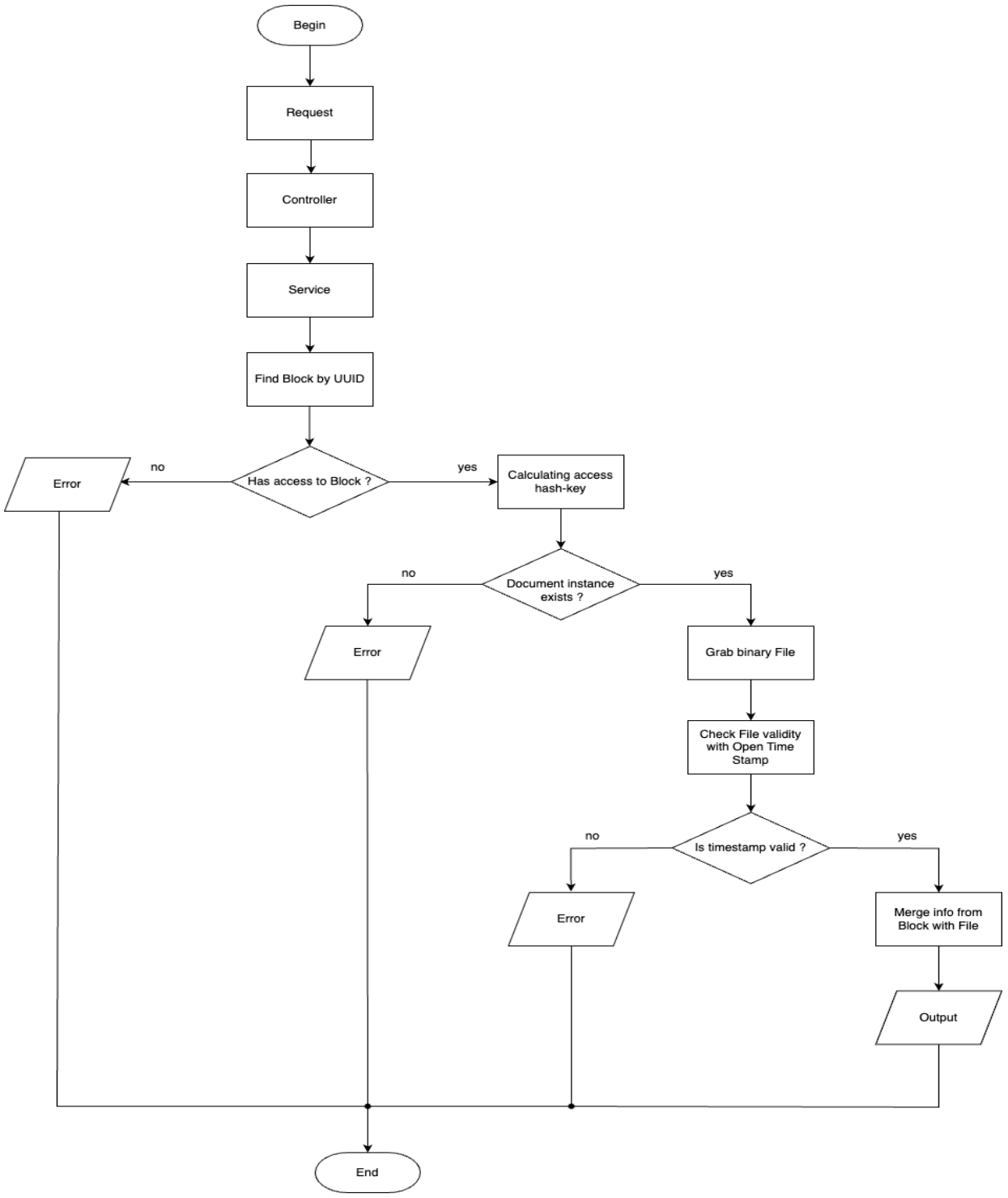


Рис. 3. Блок-схема алгоритму доступу до документу в системі

Висновки. Таким чином, запропонований підхід дозволяє ефективно запобігати фальсифікації, забезпечує надійність даних та знижує витрати на підтримку і розробку системи. Оскільки для зберігання файлів не потрібно збільшувати обсяг блоку, кожна транзакція стає менш витратною. Конфіденційна інформація про документи зберігається в блокчейні у зашифрованому вигляді, що вирішує проблеми публічності даних у блоках та захищає від несанкціонованого доступу.

Основна ідея дослідження полягала в модифікації off-chain підходу з додаванням нового рівня захисту між розподіленою та централізованою базами даних. З цією метою було впрова-

джено механізм динамічного генерування ключа доступу, що підвищує ентропію між елементами даних у системі та забезпечує високий рівень зв'язаності.

Додатково, було розроблено та застосовано власний алгоритм Proof of Work та продемонстровано теоретичні обрахунки його ефективності в контексті ймовірності компротеції хеш-ключа. Також було застосовано стандарт Open Time Stamps задля перевірки автентичності документу.

Переваги запропонованого рішення:

– Збільшена ентропія даних.

– Збережена продуктивність і ефективність off-chain підходу.

– Знижено собівартість управління системою порівняно з повністю децентралізованими рішеннями.

– У разі несанкціонованого доступу до сторонньої бази даних конфіденційна інформація про документ залишається недоступною завдяки вбудованому захисту блокчейн-модуля.

Хоча метод розроблений для систем електронного документообігу, його можна адаптувати й для інших сфер, що потребують захищеного зберігання документів, таких як: укладання різних юридичних угод, сертифікація та акредитація, перевірка ланцюгів постачання в логістиці – все це вимагає зберігання документів та потребує високого рівня захищеності з підтвердженням права власності.

Список літератури:

1. Zheng, Z., Xie, S., Dai, H., Chen, X., & Wang, H. An overview of blockchain technology: Architecture, consensus, and future trends // Proceedings of the IEEE. – 2017. – Vol. 105, № 9. – P. 2047–2063. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8029379 (дата звернення 15.08.2024).

2. Zyskind, G., Nathan, O., & Pentland, A. Decentralizing privacy: Using blockchain to protect personal data // Proceedings of the IEEE Security and Privacy Workshops. – 2015. – P. 180–184. URL: https://doi.org/10.1109/SPW.2015.27 (дата звернення 20.08.2024).

3. Antonopoulos, A. M. Mastering Bitcoin: Unlocking Digital Cryptocurrencies. – 2nd ed. – O'Reilly Media, 2017. – 416 p.

4. Narayanan, A., Bonneau, J., Felten, E., Miller, A., & Goldfeder, S. Bitcoin and Cryptocurrency Technologies. – Princeton University Press, 2016. – P. 2047–2063.

5. Christidis, K., & Devetsikiotis, M. Blockchain and Smart Contract for the Internet of Things // IEEE Access. – 2016. – Vol. 4. – P. 2292–2303. URL: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2566339 (дата звернення 14.10.2024).

6. Schneier, B. Applied Cryptography: Protocols, Algorithms, and Source Code in C. – 2nd ed. – Wiley, 1996. – P. 301–315.

7. Casino, F., Dasaklis, T. K., & Patsakis, C. A systematic literature review of blockchain-based applications: Current status, classification and open issues // Telematics and Informatics. – 2019. – Vol. 36. – P. 55–81. URL: https://doi.org/10.1016/j.tele.2018.11.006 (дата звернення 29.10.2024).

8. Goyal, S. Comparison of Machine Learning Techniques for Software Quality Prediction // International Journal of Knowledge and Systems Science. – 2020. – Vol. 11, № 2. – P. 20–40.

9. Tian, F. An agri-food supply chain traceability system for China based on RFID & blockchain technology // Service Systems and Service Management (ICSSSM). – 2016. – P. 225–253. URL: https://doi.org/10.1109/ICSSSM.2016.7538424 (дата звернення 20.11.2024)

10. Wang, S., Ouyang, L., Yuan, Y., Ni, X., Han, X., & Wang, F.-Y. Blockchain-Enabled Smart Contracts: Architecture, Applications, and Future Trends // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. – 2019. – Vol. 49, № 11. – P. 62–84. URL: https://doi.org/10.1109/TSMC.2019.2899270 (дата звернення 25.11.2024).

Rudnitskiy P.Ye. METHOD FOR CREATING A SECURE ELECTRONIC DOCUMENT MANAGEMENT SYSTEM BASED ON BLOCKCHAIN TECHNOLOGY

The article presents a method for developing secure electronic document management systems based on blockchain technology, with an emphasis on ensuring the confidentiality, integrity and availability of digital documents. A detailed analysis of existing solutions in this area is carried out, identifying their main shortcomings, such as the vulnerability of third-party storage, limited scalability and complexity of access control. Particular attention is paid to comparing data storage approaches using popular on-chain and off-chain approaches, as well as their advantages and limitations in the context of unauthorized access, performance, cost and scalability.

The proposed modification includes a hybrid architecture that uses the storage of confidential information on the blockchain and secure off-chain storage of the documents themselves with additional encryption. Dynamic generation of hash keys based on the Proof of Work algorithm has been introduced, which significantly increases resistance to attacks: even minimal data falsification leads to a change in the key, which theoretically makes it impossible to counterfeit. In addition, the system provides authentication of documents through Open Time Stamp, which increases the level of protection and integrity of files in real time.

The considered approaches to digital document protection demonstrate the prospects of applying blockchain technologies in various industries that require a high level of data security and reliability, such as finance, medicine, and the public sector. The study proposes a method of modifying the off-chain approach to designing legacy systems to eliminate key shortcomings, which in turn increases the level of scalability, reliability, and security in the face of modern cyber threats.

Key words: *secured electronic document management, hash keys generation, Proof of Work, Blockchain, Off-chain, confidential information protection.*

УДК 004.4'277
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/30

Савула А.А.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Коротинський А.П.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЗАСТОСУВАННЯ ЗВУКОВИХ ОЗНАК ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІКО-ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО СТАНУ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

У статті досліджено можливість застосування звукових ознак для виявлення несправностей в роботі промислового обладнання. Проаналізовано різні методи отримання акустичних ознак сигналу, включаючи спектральний центроїд, повну спектральну енергію, енергію в заданих частотних діапазонах, відношення енергій різних частотних смуг та спектральну щільність потужності. На основі експериментальних даних роботиелектродвигуна проведено порівняльний аналіз ефективності досліджуваних акустичних ознак. Встановлено, що спектральний центроїд демонструє стабільну різницю між справним та несправним станами з дисперсією 50–100 Гц, що дозволяє використовувати його як надійний індикатор зміни технічного стану, використавши просте порівннян з попередніми або взірцевими записима. Аналіз енергетичних характеристик у діапазонах середніх (100–1000 Гц) та високих (1000–10000 Гц) частот виявив значне зростання енергії при появі несправностей. Також було продемонстровано, що несправності можуть проявлятися як в загальному широкому спектрі діапазонів так і в більш вузькому спектрі частот, що робить підхід розкладання аудіо сигналу на частотні проміжки ефективним інструментом для аналізу та більш точного визначення типу несправності в подальшому. Дослідження відношень енергій частотних смуг до загальної енергії сигналу дозволило ідентифікувати та виокремити окремі частотні проміжки, де енергія зростає, що напряму вказує про зміну стану та є потужним індикатором для пошуку частотного діапазону несправностей.

Для кількісної оцінки відмінностей між технічними станами застосовано метрику косинуса подібності, що дозволяє ефективно порівнювати вектори ознак. Експериментальні результати показали суттєву різницю між записами справного обладнання та обладнання з малопомітними дефектами, підтверджуючі можливість використання як ознак так і самої метрики для виявлення дефектів промислового обладнання на основі записів звуку його роботи. Що дає змогу в подальшому будувати промислові системи автоматизації і використовувати такий підхід у промисловості.

Ключові слова: *технологічний об'єкт, алгоритми, критерії, система підтримки прийняття рішень.*

Постановка проблеми. В умовах сучасного промислового виробництва надійність та безперервність роботи обладнання є критичними факторами забезпечення ефективності підприємства. Несвоєчасне виявлення несправностей може призвести до значних фінансових втрат через простої виробництва, витрати на ремонт та заміну обладнання, а також потенційні ризики для безпеки персоналу.

Традиційні методи діагностики часто вимагають зупинки обладнання для проведення перевірок, що знижує продуктивність виробництва. Також присутні випадки з контролем техніко-експулатаційного стану обладнання, до якого немає прямого доступу, до прикладу погружні насоси, що викликає потребу в спеціалізованих датчиках, які мають достатньо велику собівартість і до яких висуваються жорсткі умови монтажу та експлуатації. Крім того, візуальний огляд та планово-попереджувальні ремонти не завжди дозволяють виявити несправності на ранніх стадіях їх розвитку. Тому розробка та впровадження нових методів діагностики, зокрема на основі аналізу звукових сигналів, набуває особливої актуальності.

Використання звукових ознак для діагностики несправностей має ряд суттєвих переваг: можливість проведення моніторингу в режимі реального часу без зупинки обладнання, раннє виявлення відхилень у роботі механізмів, низька вартість впровадження порівняно з іншими мето-

дами технічної діагностики. Сучасні досягнення в галузі обробки сигналів, машинного навчання та штучного інтелекту відкривають нові можливості для автоматизації процесу діагностики на основі акустичних даних.

Тим не менш, виникає проблема дослідження використання різних аудіальних ознак в контексті промислового обладнання, оскільки для кожного типу обладнання будуть унікальни техніко-експлуатаційни умови, різні шуми, та фони. Саме тому потрібно дослідити, можливість використання певних особливостей аудіо сигналу у вирішенні задачі зміни стану обладнання для подальшого використання в промислових системах автоматизації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У статті [1] автори використовують комплексний набір звукових ознак для вирішення задачі класифікації звуків навколишнього середовища. Розглянемо детальніше кожну з використаних ознак та їх значення для аналізу. Однією з базових характеристик, що використовується в дослідженні, є частота перетину нуля (Zero-crossing Rate, ZCR). Цей параметр вимірює, як часто звуковий сигнал змінює своє значення між позитивними та негативними величинами. ZCR є особливо корисним для розрізнення шумових та тональних звуків, оскільки дає уявлення про частотний склад сигналу. Спектральний центроїд (Spectral Centroid) представляє собою «центр маси» спектру сигналу. Ця характеристика вказує на частоту, навколо якої концентрується основна енергія сигналу, що дозволяє оцінити так звану «яскравість» звуку. Спектральний центроїд є важливим параметром для розрізнення різних типів звуків за їх тембральними характеристиками. Автори також використовують спектральний спад (Spectral Rolloff), який визначає частоту, нижче якої зосереджено певний відсоток спектральної енергії. Ця характеристика допомагає краще зрозуміти розподіл енергії в спектрі звуку та є корисною для класифікації різних типів звукових сигналів. Спектральна ширина (Spectral Bandwidth) вимірює ширину частотного діапазону сигналу та показує, наскільки широко розподілена енергія по частотному спектру. Ця характеристика важлива для визначення «щільності» звуку та його спектральної насиченості. Результати дослідження показують, що такий комплексний набір ознак дозволяє досягти високої точності класифікації Але залишається питання можливості використання цих самих ознак для класифікації промислових несправностей.

Авторами статті [2] було розглянути можливість використання таких ознак як швидке перетворення Фур'є та мел частотні кепстральні ознаки для класифікації сегментів аудіо сигналу. Базуючих на цих ознаках з використанням згорткових нейромереж вони дослідили, що є можливість класифікувати певні сегменти аудіо записів базуючись на цих ознаках. Але важливо зазначити, що для створення подібного класифікатора важливо мати великий об'єм навчальної вибірки, що не є можливим при класифікації стану несправностей, оскільки підприємства намагаються підтримувати промислове обладнання в як умога кращому техніко експлуатаційному стані.

Авторами статті [3] було запропоновану велику кількість ознак і їх комбінацій, а саме: Spectral centroid (SC), Spect roll-off (SR), Spectral flux (SF), Spectral bandwidth (SB), Stereo panning spectrum features (SPSF), Spectral flatness Measure (SFM), Spectral crest factor (SCF), Zero-crossing rate. Це відноситься до категорії спектральних ознак сигналу. Також є категорія тембральних ознак. Метою було дослідити чи можна використовувати ці ознаки в кластеризації і класифікації типив аудіо сигналів. В результаті автори отримали високі показники точності моделей машинного навчання з використанням цих ознак.

Авторами статті [4] було досліджено використання таких ознак як відношення енергій, спектральний центроїд, середньоквадратичний корінь енергії, широкосмугова енергія та розподіл енергії за частотами для різних типів задач, а саме: класифікація жанрів музики, розпізнавання мови, та генерація аудіо. Також було досліджено використання цих ознак з використанням різних типів алгоритмів машинного навчання, наприклад: к-середніх, дерева рішень, машина допоміжних векторів та при використанні з нейромережами, а саме: згорткові нейронні мережі та рекурентні нейронні мережі. В результаті автори отримали, що ці ознаки підходять для вирішення різних типів задач і гарно показують себе з використанням різних алгоритмів машинного навчання.

Постановка завдання. Головною метою є – дослідити можливість використання та екстракції ознак з аудіо сигналу роботи промислового обладнання для пошуку несправностей та перевірити можливість відслідковувати зміну техніко експлуатаційного стану промислового обладнання, які містять записи технічних несправностей обладнання.

Виклад основного матеріалу. На основі аналізу існуючих досліджень пов'язаних з обробкою аудіальних даних, було обрано наступні ознаки:

– Спектральний центроїд
– Повна спектральна енергія
– Енергія в заданих частотних діапазонах
– Відношення енергій різних частотних смуг
– Спектральна щільність потужності

Спектральний центроїд представляє собою «центр мас» спектру і розраховується як середньозважена частота спектру:

$$Спектральний\ центроїд(СЦ) = \frac{\sum_0^n (f[n]*m[n])}{\sum_0^n m[n]}$$

де:
– f[n] – частота для n-го біну спектру
– m[n] – магнітуда для n-го біну спектру

Повна спектральна енергія – це інтегральна характеристика, що відображає сумарну енергію сигналу по всьому частотному діапазону і обчислюється як сума квадратів амплітуд всіх частотних компонент сигналу.

Математично дана ознака виражається наступним чином:

$$Повна\ спектральна\ енергія = \sum_1^n |X(n)|^2$$

де:
– X(n) – комплексне значення k-го біну спектру
– |X(n)| – магнітуда спектру для k-го біну

Відношення енергій смуг – це характеристика, що визначає співвідношення енергій між різними частотними діапазонами аудіо сигналу і використовується для аналізу спектрального балансу. Математичне визначення:

$$Відношення\ енергій\ смуг = \frac{E_i}{E_j}$$

де:
– E_i – енергія в i-му діапазоні
– E_j – енергія в j-му діапазоні

Спектральна щільність потужності – це характеристика, що описує розподіл потужності сигналу на різних частотах. Визначає, як потужність сигналу розподілена в частотному домені.. Математичне це виражено наступним чином:

$$\text{Спектральна щільність потужності} = \frac{X(f)}{(fs * N)}$$

де:
– X(f) – перетворення Фур'є сигналу
– fs – частота дискретизації
– N – кількість точок

Для дослідження було відібрано записи роботи промислового електродвигуна з несправністю та в повністю справному стані. І було використано вище наведені методи екстракції особливостей звуку, як результат отримали наступні значення фіч. На рисунку 1 наведено графічне відображення порівняння спектрально центроїду справно електродвигуна і електродвигуна з несправністю. Можна помітити, що вони мають різні значення, тобто це може слугувати показником зміни стану і цю ознаку є сенс розглядати далі. Також знайти відхилення від норми в цій ознаці є достатньо просто, оскільки розподіл енергії є достатньо стабільний, дисперсія вибірки 50–100 Гц, ми можемо порахувати середнє значення отриманого масиву і відняти їх між собою. Це дає змогу легко застосовувати цю ознаку не тільки в алгоритмах машинного навчання а також при статистичному і аналітичному аналізі даних.

Наступною ознакою було розглянуто зміну енергії в різних частотних діапазонах. Для цього було використано широкополосний фільтр з різними зрізами частот:
– Діапазон середніх частот (100–1000 Гц):
– 200–400 Гц
– 300–700 Гц
– 400–800 Гц
– Діапазон високих частот (1000–10000 Гц):
– 1000–3000 Гц
– 2000–5000 Гц
– 3000–7000 Гц

Таким чином розділивши записи роботи обладнання на данні проміжки частот як результат було отримано, те що при появі несправностей в двигуні енергія звуку різко зростає, що наведено на рисунках 2 та 3.

При розгляді такої особливості як відношення енергії частот до загальної енергії, було використано той самий принцип, що і в попередньому випадку. Отримані результати показують, що відношення частотних проміжків до загальної енергії зростає, що в свою чергу може вказувати вже на конкретну частотну область в якій сталася несправність, тобто це може виступати гарною особливістю для використання при навчанні нейронних мереж. Результати наведені на рисунку 4.

Для того, щоб підтвердити можливість використання описаних вище ознак пов’язаних з енергетичним розподілом, а також їх ефективність при вирішенні задачі класифікації стану обладнання було пораховано таку метрику, як косинус подібності. Дані отримані після екстракції ознак з сигналу представляють собою вектор значень подібний до часового рядку, тому є можливість порівнювати їх за допомогою різних методів пошуку подібності таких як: косинус подібності, евклідова відстань та інші.

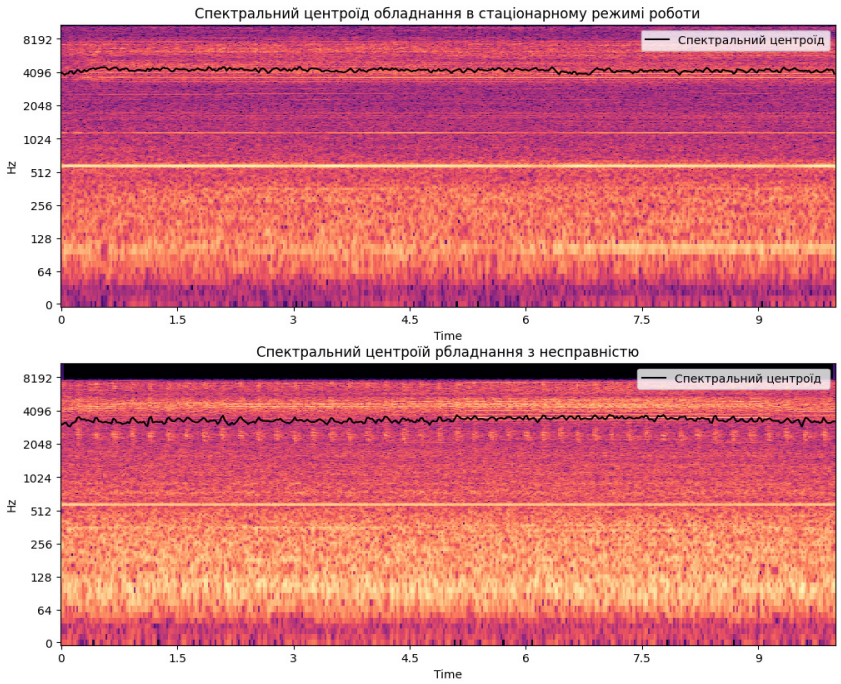


Рис. 1. Порівняння спектрального центроїду двух аудіо сигналів

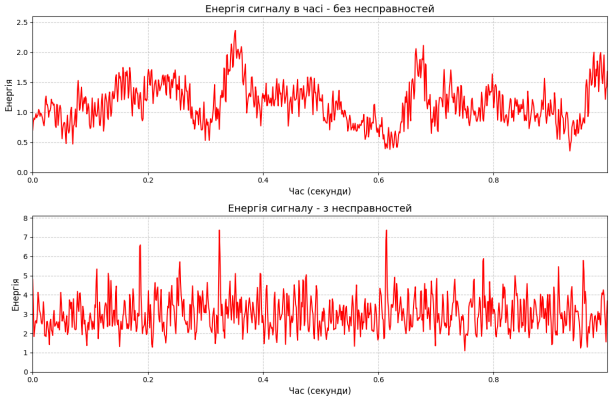


Рис. 2. Порівняння енергії зі зрізом частот 100–1000 Гц

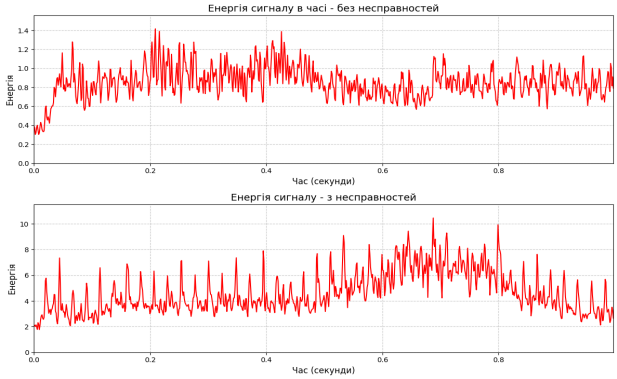


Рис. 3. Порівняння енергії зі зрізом частот 1000–10000 Гц

Косинус подібності – коефіцієнт подібності двох ненульових векторів у предгільбертовому просторі, який обчислюється як косинус кута між ними. Косинус 0° дорівнює 1, а для всіх інших значень кута в інтервалі (0,π] буде менше за 1. Отож, це оцінка напрямку, а не величини: два вектори з однаковим напрямком мають косинус подібності 1, а два вектора, які утворюють кут 90° один відносно одного, мають подібність 0, а два діаметрально направлені вектори мають подібність -1, незалежно від їх довжини. Таким чином, чим ближчі наші вектори тим ближче до 1 буде значення цієї метрики. Також вона має перевагу в тому, що при наявності хоча б одного екземпляру поломки, яка сталася, цю метрику можна використати для порівняння і знаходження цієї несправності з бази знань.

В результаті було отримано дані косинуса подібності для двох записів порівнюючи його з взірцевим. Взірцевий запис – це запис справного обладнання без поломок в робочих умовах. Другий запис – це запис того самого обладнання зроблений через певний проміжок часу, в якому відсутні явно виражені дефекти. Третій запис зроблений при відсутності явно виражених дефектів, але з наявністю малопомітних дефектів змащування. Результати порівняння косинусу подібності для ознаки розподілу енергії вздовж частот наведені в таблиці 1.

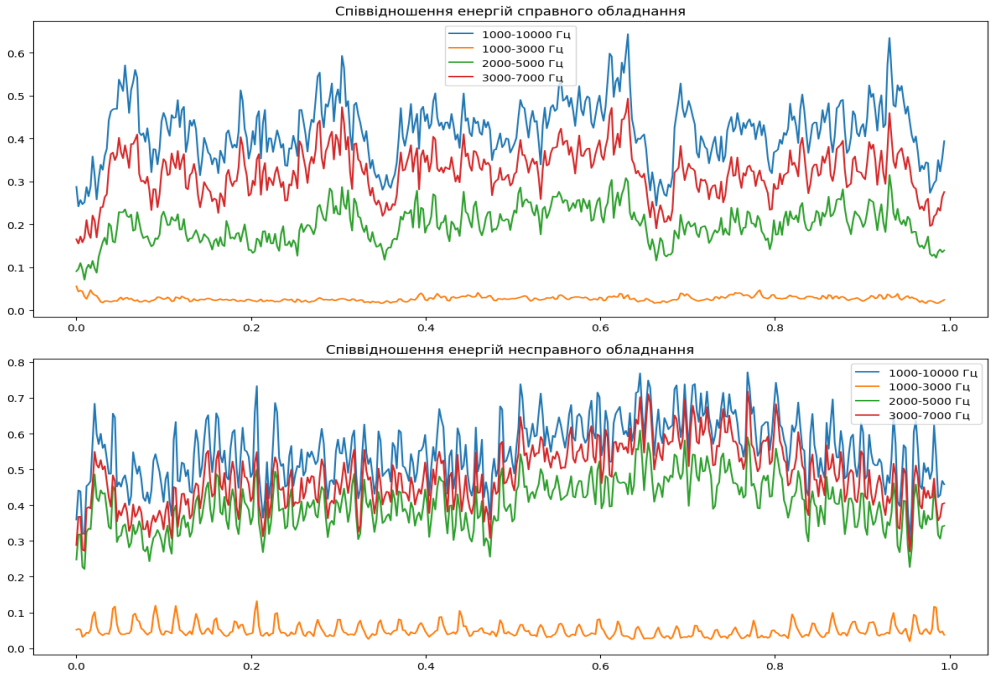


Рис. 4. Порівняно відношень енергії різних частотних проміжків до загальної енергії

Таблиця 1

Порівняння косинусу подібності розподілу енергії

Частотний зріз		Косинус подібності	
Нижня межа зрізу (Гц)	Верхня межа зрізу (Гц)	Запис без дефектів зроблений через певний проміжок часу	Запис з мало вираженими дефектами
100	1000	0.9	0.65
200	400	0.88	0.7
300	700	0.87	0.8
400	800	0.9	0.8
1000	10000	0.86	0.4
1000	3000	0.9	0.5
2000	5000	1	0.3
3000	7000	1	0.2

Таблиця 2

Порівняння косинусу подібності відношення енергій

Частотний зріз		Косинус подібності	
Нижня межа зрізу (Гц)	Верхня межа зрізу (Гц)	Запис без дефектів зроблений через певний проміжок часу	Запис з мало вираженими дефектами
100	1000	0.7	0.5
200	400	0.74	0.4
300	700	0.73	0.4
400	800	0.76	0.45
1000	10000	0.75	0.4
1000	3000	0.7	0.23
2000	5000	0.6	0.4
3000	7000	0.8	0.3

За таким самим принципом було розраховано і розглянуто косинус подібності для ознаки відношення енергій частотних проміжків до загальної енергії сигналу. У таблиці 2 наведено порівняння результатів цих рохрахунків.

Висновки. В ході проведеного дослідження було досліджено можливості використання акустичних ознак для виявлення несправностей промислового обладнання. На основі експериментальних даних було проаналізовано різні методи екстракції звукових ознак та оцінено їх ефективність для задач технічної діагностики.

Дослідження спектрального центроїду показало стабільну різницю між справним та несправним станами обладнання з дисперсією 50–100 Гц, що підтверджує можливість використання даної характеристики як індикатора зміни технічного стану. При аналізі енергетичних характеристик сигналу в різних частотних діапазонах (100–1000 Гц та 1000–10000 Гц) виявлено значне зростання енергії при появі несправностей, що дозволяє ефективно детектувати відхилення від нормального режиму роботи.

Застосування метрики косинуса подібності для порівняння векторів ознак дозволило кількісно

оцінити відмінності між різними технічними станами обладнання. Для справного стану значення косинуса подібності становили 0.86–1.0, тоді як при наявності малопомітних дефектів ці значення знижувались до 0.2–0.8, що свідчить про високу чутливість методу.

Дослідження відношень енергій частотних смуг до загальної енергії сигналу показало можливість локалізації частотних областей, пов'язаних з конкретними типами несправностей. Це створює передумови для розробки систем класифікації дефектів на основі акустичних характеристик.

Таким чином, отримані результати підтверджують перспективність використання звукових ознак для задач технічної діагностики промислового обладнання та можливість створення на їх основі автоматизованих систем моніторингу технічного стану.

Список літератури:

1. Fu Z., Lu G., Ting K. M., Zhang D. A Survey of Audio-Based Music Classification and Annotation. *IEEE Transactions on Multimedia*. 2010. № 13(2). С. 303–319.

2. Kohshelan, Wahid N. Improvement of Audio Feature Extraction Techniques in Traditional Indian Musical Instrument. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer International Publishing. Cham, 2014. С. 507–516. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07692-8_48

3. Mukkamala S. N. V. Jitendra, Radhika Y. A Review: Music Feature Extraction from an Audio Signal. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*. 2020. № 9(2). С. 973–980.

4. Constantinescu C., Brad R. An Overview on Sound Features in Time and Frequency Domain. *International Journal of Advanced Statistics and IT&C for Economics and Life Sciences*. 2023. № 13(1). С. 45–58. https://doi.org/10.2478/ijasitels-2023-0006

Savula A.A., Korotynsky A.P. APPLICATION OF SOUND FEATURE FOR MONITORING THE TECHNICAL AND OPERATIONAL CONDITION OF INDUSTRIAL EQUIPMENT

The article investigates the possibility of using acoustic features to detect faults in industrial equipment. Various methods for obtaining acoustic signal features are analysed, including the spectral centroid, total spectral energy, energy in specified frequency bands, the ratio of energies of different frequency bands, and power spectral density. On the basis of experimental data from an electric motor, a comparative analysis of the effectiveness of the studied acoustic features is carried out. It was found that the spectral centroid demonstrates a stable difference between the serviceable and faulty states with a dispersion of 50–100 Hz, which allows it to be used as a reliable indicator of changes in the technical condition using a simple comparison with previous or reference records. The analysis of energy characteristics in the medium (100–1000 Hz) and high (1000–10000 Hz) frequency ranges revealed a significant increase in energy when faults occur. It was also demonstrated that faults can occur both in the general wide range of bands and in a narrower range of frequencies, which makes the approach of decomposing the audio signal into frequency bands an effective tool for analysing and more accurately determining the type of fault in the future. The study of the ratios of the energies of frequency bands to the total energy of the signal allowed us to identify and isolate individual frequency bands where the energy increases, which directly indicates a change in the state and is a powerful indicator for finding the frequency range of faults.

To quantify the differences between technical states, the cosine similarity metric is applied, which allows for an effective comparison of feature vectors. The experimental results showed a significant difference between the recordings of serviceable equipment and equipment with subtle defects, confirming the possibility of using both the features and the metric itself to detect defects in industrial equipment based on sound recordings of its operation. This makes it possible to build industrial automation systems and use this approach in industry in the future.

Key words: *technological object, algorithms, criteria, decision support system.*

УДК 004.415(043)
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/31

Сагайда П.І.
ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка»

Костіков О.А.
ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка»

АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МЕТОДУ ВЕРИФІКАЦІЇ ОНТОЛОГІЧНОЇ МОДЕЛІ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕОРІЇ КАТЕГОРІЙ ПІД ЧАС ПРОЕКТУВАННЯ СХОВИЩ ДАНИХ ТА ЗНАНЬ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Мета дослідження полягала у розробці формального методу та його алгоритмічного забезпечення для підтримки проєктування інформаційних систем, здатних до інтелектуальної обробки даних на основі баз даних та знань, які інтегруються до складу таких систем. Для досягнення цієї мети було запропоновано використовувати категоріально-онтологічний підхід як метамову моделювання. Методологія дослідження передбачала застосування Unified Modeling Language (UML) для представлення загальної онтологічної моделі в категоріально-теоретичних термінах. Цей підхід дозволив накласти суворі математичні обмеження на об'єкти та морфізми категорії, що відповідають поняттям та відношенням у моделі предметної області. Завдяки використанню категоріально-онтологічного підходу стало можливим: формалізувати суб'єктивні рішення, прийняті в процесі інженерії знань; використовувати об'єкти теорії категорій як високорівневі шаблони проектування; забезпечити верифікацію результатів онтологічного моделювання. Розробка та використання відповідного алгоритмічного забезпечення показали, що категоріально-онтологічний підхід є перспективним інструментом для розробки ефективних інформаційних систем, оскільки він забезпечує формальну основу для моделювання та проектування, а також сприяє підвищенню якості та надійності розробок. Алгоритм, наведений в роботі, дозволяє автоматизувати складний етап моделювання предметних областей, на якому відбувається перетворення категоріально-онтологічної моделі у діаграми класів UML для подальшої формалізації результатів концептуального проєктування інформаційної системи. Введення та обґрунтування обмежень для об'єктів теорії категорій на комутативних діаграмах для розроблених категоріально-онтологічних моделей дозволило довести існування та унікальність морфізмів, що обумовлюють несуперечливість онтологічної моделі та необхідність введених у моделі концептів та зв'язків між ними, а також досяжність результатів відображень та перетворень, описаних цією моделлю.

Ключові слова: *категоріально-онтологічний підхід, Unified Modeling Language, інформаційні системи, інтелектуальна обробка даних, верифікація.*

Постановка проблеми. Сучасні підприємства та організації потребують впровадження, за результатами відповідної розробки та дослідження, ефективних методів проектування інформаційних систем, здатних до інтелектуальної обробки даних [1, 2]. Необхідно залучати до процесу проектування фахівців предметної області, які, хоча й не мають глибоких знань в ІТ, володіють цінною експертизою та можуть сформулювати базову модель предметної області у вигляді тезауруса або онтології [3]. Співпраця фахівців предметної області та інженерів знань є критично важливою для успішного проектування системи. Фахівці предметної області надають глибоке розуміння своєї галузі, а інженери знань перетворюють ці знання в формальну модель. На даний момент розроблено ряд рекомендацій для ефективного концептуального моделювання [4, 5], однак існуючі підходи до створення таких систем часто базуються на інтуїції та досвіді фахівців, що може призводити до суб'єктивних оцінок та труднощів у верифікації результатів.

Для вирішення цієї проблеми необхідно застосувати єдиний, формалізований метод проектування, заснований на міцній математичній основі. Такий підхід дозволить забезпечити доказовість та об’єктивність результатів, а також полегшить співпрацю фахівців з різних галузей та аспектів проєктування.

Одним із перспективних напрямків для цього є застосування теорії категорій. Цей розділ мате-

матики пропонує потужний інструментарій для формалізації знань та побудови абстрактних моделей [6, 7]. Використання теорії категорій дозволить створювати більш точні та наочні моделі предметних областей, а також здійснювати строгу верифікацію концептуальних моделей. Крім того, теорія ескізів, як розвиток теорії категорій, дозволяє представляти математичні конструкції у вигляді графів та діаграм [8-10]**.** Це значно спрощує розуміння моделей навіть для фахівців, які не мають глибоких знань математики. Такий візуальний підхід до моделювання сприяє ефективній комунікації між членами проектної команди та замовниками.

Таким чином, використання теорії категорій та теорії ескізів дозволить забезпечити потрібний рівень формалізації та точності у процесі проектування інформаційних систем, що, в свою чергу, призведе до підвищення якості та надійності розробок.

Постановка завдання. Об'єктом дослідження є розробка алгоритмічного забезпечення універсального методу проектування інформаційних систем, здатних до інтелектуальної обробки даних. Цей метод базується на категоріально-онтологічному підході, розробленому у [11], і дозволяє забезпечити послідовність і верифікованість етапів концептуального проєктування сховищ даних та знань інформаційних систем. На цих етапах відсутній єдиний, строго формалізований метод проєктування інформаційних систем. На сьогоднішній день різні команди розробників використовують різноманітні методики та технології, що ускладнює співпрацю та іноді призводить до семантичних бар'єрів між ними. Потрібен наскрізний метод, який підходить для командної роботи над проєктами та спрощує обмін знаннями як серед учасників команд, так і з замовниками та експертами в предметній області [12].

Мета дослідження полягає у створенні відповідного алгоритмічного забезпечення такого методу. Його використання дозволить об'єднати зусилля аналітиків, розробників та замовників з використанням формальної основи для опису предметної області, а також надати засоби для верифікації та валідації розроблених часткових онтологічних моделей.

Для досягнення поставленої мети необхідно: проаналізувати існуючі підходи, визначити їх сильні та слабкі сторони, а також можливості інтеграції; запропонувати формальний алгоритм для перевірки правильності та повноти онтологічних моделей; застосувати для цього теорію категорій, а саме – використати математичний апарат теорії категорій для верифікації абстрактних моделей предметних областей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Традиційні підходи до концептуального моделювання та проектування сховищ даних та знань інформаційних систем можна віднести до таких, що формалізують, в основному, підхід, орієнтований на формалізацію атрибутів (властивостей). Прикладами його є технологія з використанням діаграм «сутність-відношення-атрибут» (ERA) [13] і технологія Anchor [14]. Технологіями моделювання більш високого рівня абстракції є модель Entity-Relationship Diagrams (ERD) [15], і фреймворк Semantic Web, Resource Description Framework (RDF) [16].

Історично склалося так, що однією з перших технологій моделювання предметних областей та програмного забезпечення стала реалізація об'єктно-рольового моделювання (ORM). На основі ORM була розроблена технологія Integration DEFinition for Information modeling (IDEF1X), яка є невід'ємною частиною сімейства методів діаграм IDEF, яка використовується для формалізації різних аспектів ПрО. Результатом злиття декількох схожих підходів до моделювання і формалізації, а також проектування апаратних і програмних комплексів стала технологія моделювання Unified Modeling Language (UML) [17], яка надає широкі можливості для моделювання класів, їх екземплярів і відносин між ними. Однак для представлення бізнес-правил і алгоритмів взаємодії в об'єктах знадобилося розробити спеціалізовану мову на основі UML-діаграм - Object Constraint Language (OCL) [17]. Застосування OCL дозволило використовувати для цієї мети вирази, близькі за виразом до логіки першого порядку, але специфічні і складні з точки зору фахівців в ПрО.

Для підвищення рівня абстракції при моделюванні та автоматизації розробки ІС в останні роки розроблена і впроваджується ініціатива Meta-Object Facility (MOF) [18]. MOF передбачає використання стандарту для розробки на основі моделі, підготовленого Object Management Group на основі UML. Аналіз показує, що даний підхід є метамоделлю над UML і не має інших корисних властивостей для задач, що вирішуються в даній роботі.

В якості основи для методу, який розглядається в дані й роботі, застосовуються технології, засновані на категоріальному підході до моделювання ПрО, так як цей підхід дозволяє верифікувати інформаційні моделі, що зазвичай виражають суб'єктивну точку зору їх авторів, на основі формального математичного апарату. До цих тех-

нологій, заснованих як на представленні атрибутів, так і на підході теорії категорій, відносяться Olog Diagrams [7] і Sketches, які є розвитком технології ERA [13]. Авторами цих технологій розроблені мови і засоби автоматизації отримання схем баз даних з діаграм відповідно Algebraic Query Language (AQL) і Graphical modeling of EA sketches and views (EASIC).

Недоліком цих технологій, незважаючи на деякі елементи онтологічного моделювання, є відсутність в їх складі засобів для представлення правил верифікації складних онтологічних моделей підприємств і організацій.

Виклад основного матеріалу. Як було вказано, часткова онтологічна модель є суб'єктивною й на практиці наразі математично не верифікується. У роботі застосовано підхід категоріально-онтологічного (КО) моделювання, що реалізує побудову онтологічних моделей, які верифікуються на основі теорії категорій і скетчів. Метод побудови онтологічних моделей, представлених у нотації діаграми класів UML та верифікованих на основі теорії категорій, сформульовано далі у вигляді алгоритму відповідних перетворень. Етапи реалізації методу, у вигляді діаграми SADT, наведено на рис. 1.

Цей метод передбачає використання теорії категорій для формалізації знань про предметну область і створення онтологічних моделей. На діаграмі SADT (рисунок 1) наведено наступні елементи.

Відомості про ПрО: вхідні дані для процесу моделювання, які включають інформацію про предметну область, для якої створюється модель.

Онтологічне моделювання ПрО: активність, яка перетворює вихідні дані про предметну область в онтологічну модель.

Часткова онтологічна модель: проміжний результат процесу моделювання, який представляє частину повної онтологічної моделі, отриману від аналітика-проектувальника; вона відображає аспект розгляду предметної області та суб'єктивні знання аналітика.

Категоріально-онтологічне (КО) моделювання ПрО: активність, яка використовує методи теорії категорій та її топологічні шаблони для формалізації онтологічної моделі.

КО-модель ПрО: кінцевий результат процесу моделювання, який представляє формалізовану онтологічну модель в термінах теорії категорій.

Верифікація онтологічної моделі: активність, яка перевіряє коректність і повноту отриманої онтологічної моделі з урахуванням отриманої КО-моделі, за відповідним алгоритмом відображення.

Алгоритм відображення концептів і зв'язків: набір правил, який дозволяє перевести онтологічну модель в формат, зручний для подальшої обробки (наприклад, у вигляді UML-діаграми).

Символьна модель у форматі UML: кінцевий результат процесу перетворення онтологічної моделі в у вдосконалений її варіант, верифікова-

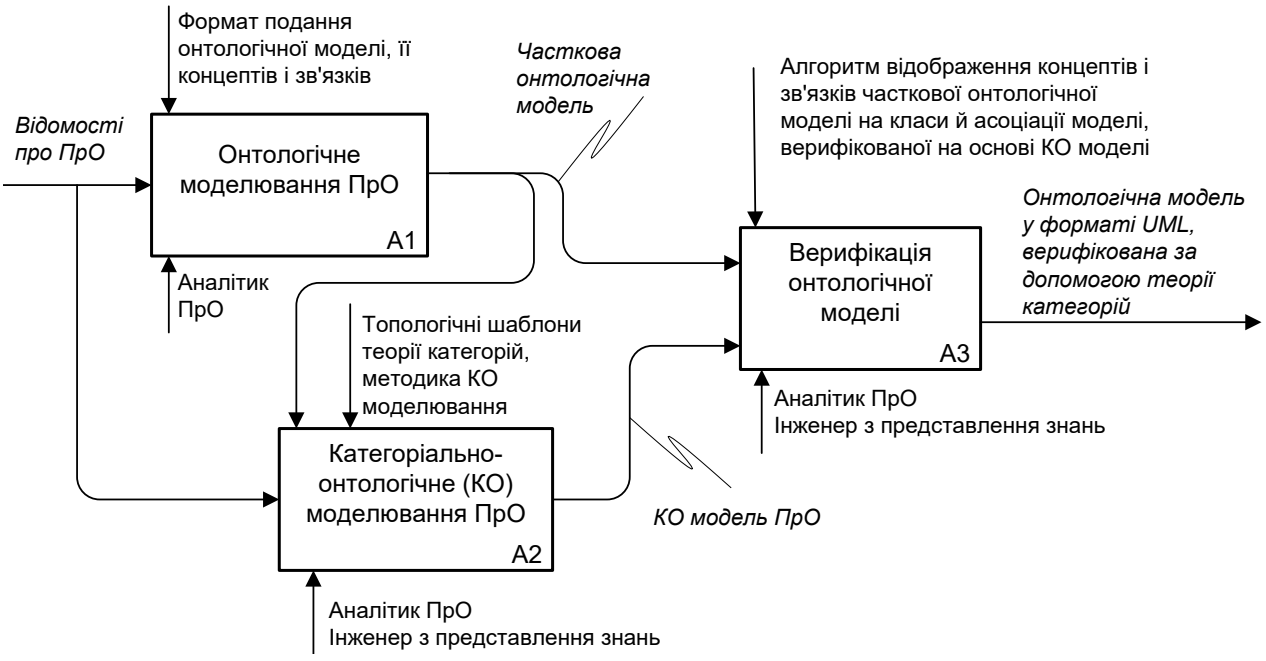


Рис. 1. SADT-діаграма етапів реалізації методу побудови онтологічних моделей, верифікованих на основі теорії категорій

ний на основі об’єктів, морфизмів та теорем теорії категорій, у форматі подання, зрозумілому розробникам бази даних та знань або інформаційної системи.

Таким чином, можна сформулювати основні етапи процесу побудови онтологічних моделей, верифікованих на основі теорії категорій:

1. Збір інформації про предметну область: на цьому етапі збираються всі необхідні дані про предметну область, для якої створюється модель.

2. Побудова часткової онтологічної моделі: на основі зібраних даних створюється початкова версія онтологічної моделі.

3. Формалізація за допомогою теорії категорій: часткова модель трансформується в категоріальну модель, з урахуванням відомостей про предметну область, зібраних на першому етапі.

4. Верифікація моделі: проводиться перевірка коректності та повноти часткової онтологічної моделі на основі категоріального представлення відомостей про предметну область; також виконується перевірка категоріальної моделі з точки зору урахування всіх сутностей та зв’язків між ними (це може вимагати декількох ітерацій з взаємним узгодженням вмісту обох моделей); додаються або трансформуються, за необхідності, елементи часткової онтологічної моделі, таким чином, щоб вони відповідали відомостям про предметну область та топологічним шаблонам побудованої категоріальної моделі.

5. Перетворення в UML: категоріально-онтологічна модель, тобто онтологічна модель, узгоджена з категоріальною моделлю, переводиться в формат UML для подальшого використання в процесі розробки інформаційного та програмного забезпечення.

Для реалізації розробленого підходу було проведено глибокий та докладний аналіз етапу перетворення категоріально-онтологічної моделі, тобто моделі, побудованої аналітиками на основі відомостей про предметну область та методик використання топологічних шаблонів теорії категорій, в модель нотації UML. Ця модель на етапі верифікації (активність A3 на рисунку 1) власне і використовується для перевірки якості часткової онтологічної моделі, побудованої розробниками баз даних та знань інформаційної системи. Етап, який буде докладно розглянуто в даній роботі, є визначальним з точки зору якості проєктування інформаційних систем, оскільки забезпечує адекватність результатів концептуального моделювання та узгодженість моделей для відповідної ефективної реалізації.

За результатами розробки та вивчення процесу побудови КО-моделі в форматі подання UML був розроблений узагальнений алгоритм. Його реалізація дозволяє верифікувати загальну онтологічну модель на основі положень, аксіом та теорем теорії категорій (ТК). Компоненти алгоритму, що описують окремі етапи відображення елементів моделі, показані на рисунку 2.

Для розробленого алгоритму, крім розглянутих раніше термінів і об'єктів, необхідно пояснити наступний момент. Визначення класів-асоціацій виконується на основі об'єктів ТК pullbacks, products, equalizers, cones, що входять у множину лімітів, $\lim\limits_{O\in Obj_\Gamma}\Gamma(O)$ і об'єктів ТК pushouts, coproduct, coequalizer, cocones, що входять в множину колімітів $\operatorname{colim}\limits_{O\in Obj_\Gamma}\Gamma(O)$, для яких $Lim_\Gamma=\left\langle \lim\limits_{O\in Obj_\Gamma}\Gamma(O),\operatorname{colim}\limits_{O\in Obj_\Gamma}\Gamma(O)\right\rangle$, і кожен такий об'єкт задовольняє вимозі:

$$L\cong\left\langle O_L\subseteq Obj_\Gamma,\mu_L\subseteq Hom_\Gamma\mid\forall O_L\subseteq\{dom(\mu_L)\cup cod(\mu_L)\}\right\rangle\in Lim_\Gamma. \quad (1)$$

Твердження, що використовуються в наведеному алгоритмі, вводяться та обґрунтовуються на основі положень, визначень та лем ТК [6, 7, 9]. Введення та обґрунтування обмежень для об'єктів ТК на комутативних діаграмах для розроблених КО-моделей дозволило довести існування та унікальність морфізмів, що обумовлюють несуперечливість онтологічної моделі та необхідність введених у моделі концептів та зв'язків між ними, а також досяжність результатів відображень та перетворень, описаних цією моделлю.

Обговорення результатів. В результаті застосування запропонованого методу та розробленого для його реалізації алгоритмічного забезпечення були подолані деякі семантичні і лінгвістичні бар'єри між розробниками під час проектування ІС. Замовники, аналітики та розробники мають можливість використовувати наскрізний метод, придатний для колективної роботи та обміну знаннями, який є зрозумілим та об'єктивним з точки зору доказовості та валідності моделей. Цей метод може бути використаний для повного комплексу науково-дослідних і проектних робіт, незалежно від форматів представлення даних і схематичних прийомів формалізації знань ПрО. Категоріально-онтологічний підхід до моделювання та проектування дає можливість формально обґрунтовувати суб'єктивні результати інженерії знань та використовувати об'єкти теорії категорій у вигляді шаблонів проектування на високому рівні абстракції [19].

Особливістю розробленого методу є підвищення вимог до рівня абстрактного мислення аналітиків, що займаються онтологічним моделюванням ПрО. При використанні розробленого

Input: // General ontological model; Categorical-ontological model
PrivateOntology $= \langle Concepts, Relations \rangle$; **COmodel** $= \langle Obj_\Gamma, Hom_\Gamma, \mathrm{Lim}_\Gamma \rangle$;
Output: // Verified ontological model in the form of an UML class diagram
VerifiedOntology $= \langle Classes, Links, PartConstraints, Attributes \rangle \cong$ **UML**;
begin
$Classes = \{\}$; $Links = \{\}$; $PartConstraints = \{\}$; $Attributes = \{\}$;
// Verification and addition to the resulting model of all concepts
// from the CO model and connections generation based on morphisms
for all $O \in Obj_\Gamma$ ***in*** **COmodel** ***do***
for all $C \in Concepts$ ***in*** **PrivateOntology** ***do***
if not $O \cong C$ then C=create(O) ***as*** Concept;
$Classes = Classes \cup C$;
for all $\mu \in Hom_\Gamma$ ***in*** **COmodel** ***do***
if not $\exists C \cong dom(\mu)$ ***then*** C_{Dom}=createDomain(μ) ***as*** Concept;
if not $\exists C \cong cod(\mu)$ ***then*** C_{Cod}=createCodomain(μ) ***as*** Concept;
$Classes = Classes \cup C_{Dom} \cup C_{Cod}$;
$Links = Links \cup (\mu$ as Link);
end for;
end for;
end for;

// Definition of classes-associations based on limits and colimits in the CO model
for all $L \in Lim_\Gamma$ ***in*** **COmodel** ***do***
for all $C \in Concepts$ in **PrivateOntology** ***do***
if not $L \cong C$ ***then*** C_{As}=createClassAssotiation(L) ***as*** Concept;
$Classes = Classes \cup C_{As}$;
for all $R \in Links$ ***in*** **VerifiedOntology** ***do***
if not isPartOf(C_{As}, R) ***and*** $Domain(R) \cup Range(R) \cap dom(\mu_L) \cup cod(\mu_L) \neq \emptyset$
then R=completeAssociation(C_{As}, R);
end for;
end for;
end for;

// Search and exclusion of connections from the resulting model that do not satisfy
//the laws of commutativity and composition according to the CO model;
for all $R_i, R_j, R_q \in Links$ ***in*** **VerifiedOntology** ***do***
for all $\mu_m, \mu_n, \mu_k \in Hom_\Gamma$ ***in*** **COmodel** ***do***
if $(R_i \cong \mu_m, R_j \cong \mu_n, R_q = R_j \circ R_i, \mu_k = \mu_n \circ \mu_m)$ ***and*** $R_q \ncong \mu_k$ ***then*** $Links = Links \setminus \{R_q\}$;
end for;
end for;
// Finding and excluding classes from the resulting model that are aggregations of
// previously entered classes and relations, or for which no relations are established
for all $\langle C_i, C_j, C_q \rangle \in Classes$ ***in*** **VerifiedOntology** ***do***
for all $R \in Links$ ***in*** **VerifiedOntology** ***do***
if $C_i \cong \langle \{C_j = Range(R), C_q = Domain(R)\}; R \rangle$ ***then*** $Classes = Classes \setminus \{C_i\}$;
if not $C_j = Range(R)$ ***or*** $C_j = Domain(R)$ ***then*** $Classes = Classes \setminus \{C_j\}$;
end for;
end for;

// Imposing restrictions on the type of relations in the UML model and restrictions
// on the participation cardinality of the class instances in relationships
for all $R \in Links$ ***in*** **VerifiedOntology** ***do***
for all $C \in Concepts$ in **PrivateOntology** ***do***
if isParticipant(R, C) ***then begin***
PC = createPartConstraint(R, C, **PrivateOntology,COmodel**);
$PartConstraints = PartConstraints \cup PC$; ***end***;
end for;
end for;
// Mapping the corresponding objects of the CO model into class attributes
// in the UML model
for all $C \in Concepts$ in **PrivateOntology** ***do***
for all $Cl \in Classes$ ***in*** **VerifiedOntology** ***do***
if isAttributeOf(C, Cl) ***then begin***
At = createAttributeOf(C, Cl, **PrivateOntology, COmodel**);
$Attributes = Attributes \cup At$; ***end***;
end for;
end for;
return (**VerifiedOntology** $\cong$ **UML**);
end

Рис. 2. Алгоритм побудови діаграми класів і відношень в UML на основі категоріально-онтологічної моделі, що дозволяє верифікувати загальну онтологічну модель шляхом застосування теорії категорій

методу вони повинні оволодіти математичними основами теорії категорій і ескізів та навичками використання своїх положень при представленні результатів інженерії знань. Як і в будь-якому способі формалізації знань, якісні результати можуть бути отримані тільки на основі досвіду тривалого практичного застосування розробленого методу.

Додатковими можливостями, що виникають при досягненні мети даного дослідження, є вирішення проблем інтелектуалізації комп'ютерних систем, підвищення якості розробки та ефективності використання таких систем на основі методів інженерії знань. Це дозволяє розробляти продуктивні ІС, які виконують завдання оперативної та аналітичної обробки даних, ефективної інженерії знань та вилучення адекватних моделей з наборів даних. Складові таких ІС впроваджені на ряді промислових підприємств, у наукову діяльність та освітній процес [11, 12].

Труднощі застосування отриманих результатів в дослідженні результатів пов'язані з наступним фактором. Фахівці, які застосовують відповідну методику проектування протягом тривалого часу і отримують задовільні результати, можуть мати відповідні упередження до запропонованого методу і сумніватися в його практичній корисності. Разом з тим, зростаюча складність ІС і масштабу вирішуваних з їх допомогою завдань, зростаюча конкуренція в області інформаційних технологій, вимагають розробки нових підходів до проектування, заснованих на сучасних досягненнях наукової думки.

Висновки. Проведено порівняльне дослідження підходів і методів, що використовуються при концептуальному проектуванні інформаційних систем. Визначено, що моделі, створені на різних етапах проектування та з використанням різних методик, не дозволяють виконати їх відображення без втрат. Така ситуація вимагає розробки і застосування методу, придатного для колективної роботи і обміну знаннями, що інтегрує існуючі методи і базується на єдиному математичному апараті.

Розроблено алгоритмічне забезпечення методу проектування інформаційних систем для розв'язання задач обробки та аналізу даних на основі категоріально-онтологічних моделей. В результаті розробки і застосування даного методу були подолані семантичні і лінгвістичні бар'єри, що виникають між членами проектної команди при проектуванні ІС. Використання категоріально-онтологічного підходу до моделювання та проектування дає можливість формально обґрунтовувати суб'єктивні результати інженерії знань та використовувати об'єкти теорії категорій у вигляді шаблонів проектування на високому рівні абстракції. Алгоритм, наведений в роботі, дозволяє автоматизувати складний етап моделювання предметних областей, на якому відбувається перетворення категоріально-онтологічної моделі у діаграми класів UML для подальшої формалізації результатів концептуального проєктування інформаційної системи.

Список літератури:

1. Business intelligence and analytics: systems for decision support. In: R. Sharda at al. (Eds.). London, UK: Pearson Education, 2014.

2. Data mining: practical machine learning tools and techniques. In: Witten, I. H., Eibe, F. (Eds.). Burlington: Morgan Kaufmann Publishers, 2005.

3. Gruber T. A translation approach to portable ontologies. URL : http://www-ksl.stanford.edu/kst/what-is-an-ontology.html.

4. Guizzardi G. Ontological Foundations for Structural Conceptual Models. Veenendaal, The Netherlands, Universal Press, 2005.

5. Gomez-Perez A., Fernandez-Lopez M., Corcho O. Ontological engineering. Springer, 2004.

6. Walter R.F.C. Categories and Computer Science. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1991.

7. Spivak D. I. Category theory for the sciences. MIT Press, 2014.

8. Wells C. Sketches: Outline with References. URL : http://www.cwru.edu/artsci/math/wells/pub/pdf/Sketch.pdf.

9. Barr M. Models of sketches. *Cashiers Topologie Geom. Differentielle*. 1986. Vol. 27. P. 93–107.

10. Wells, C.: A generalization of the concept of sketch. *Theoretical Computer Science*. 1990. Vol. 70 (1). P. 159–178.

11. Сагайда П.І. Алгоритмічні засоби та програмні компоненти комп`ютерних систем інтелектуальної обробки даних в організаційно-технічних комплексах : дис. … д-ра техн. наук : 05.13.05. Покровськ, 2018. 541 с.

12. Sahaida P. Development of methodology for data and knowledge warehouse design in computer systems for intellectual data processing. *Technology audit and production reserves: Information and Control Systems.* 2018. Vol. 1, No 2(39), P. 10–15.

13. Johnson, M., Rosebrugh, R., Wood, R. J. Entity-relationship-attribute designs and sketches. *Theory and Applications of Categories*. 2002. Vol. 10 (3). P. 94–112.

14. About Anchor Modeling. URL : http://www.anchormodeling.com.
15. Date C. J. An Introduction to Database Systems. Ed. 8. Pearson, 2003.
16. Ontology Management: Semantic Web, Semantic Web Services, and Business Applications / Eds. M. Hepp at al. Springer, 2007.
17. Larman C. Applying UML and Patterns: An Introduction to Object-Oriented Analysis and Design and Iterative Development. Addison Wesley Professional, 2004.
18. ISO/IEC 19502:2005. Information technology – Meta Object Facility (MOF). URL : http://webstore.iec.ch/preview/info_isoiec19502%7Bed1.0%7Den.pdf.
19. Tarasov O., Sahaida P., Podlesny S., Vasylieva L. Categorical-ontological approach to information support of educational activities. *Conference on History, Theory and Methodology of Learning:* 3rd International (ICHTML 2022), Kryvyi Rih, Ukraine, SHS Web Conf., 2022. Vol. 142. DOI: https://doi.org/10.1051/shsconf/202214203005.

Sahaida P.I., Kostikov O.A. ALGORITHMS FOR THE VERIFICATION METHOD OF THE ONTOLOGICAL MODEL USING CATEGORY THEORY DURING THE DESIGN OF DATA AND KNOWLEDGE WAREHOUSES OF INFORMATION SYSTEMS

The purpose of the study was to develop a formal method and its algorithms to support the design of information systems capable of intelligent data processing based on databases and knowledge that are integrated into such systems. To achieve this goal, it was proposed to use the categorical-ontological approach as a modeling metalanguage. The research methodology involved the use of the Unified Modeling Language (UML) to represent the general ontological model in categorical-theoretical terms. This approach allowed imposing strict mathematical constraints on the objects and morphisms of the category corresponding to the concepts and relations in the subject domain model. Thanks to the use of the categorical-ontological approach, it became possible to: formalize subjective decisions made in the process of knowledge engineering; use category theory objects as high-level design templates; ensure verification of the results of subjective ontological modeling. The development and use of the corresponding algorithmic support showed that the categorical-ontological approach is a promising tool for the development of effective information systems, since it provides a formal basis for modeling and design, and also contributes to improving the quality and reliability of developments. The algorithm presented in the work allows you to automate the complex stage of modeling subject areas, at which the categorical-ontological model is transformed into UML class diagrams for further formalization of the results of the conceptual design of the information system. The introduction and justification of restrictions for category theory objects on commutative diagrams for the developed categorical-ontological models made it possible to prove the existence and uniqueness of morphisms that determine the consistency of the ontological model and the necessity of the concepts introduced into the model and the connections between them, as well as the accessibility of the results of the mappings and transformations described by this model.

Key words: *categorical-ontological approach, Unified Modeling Language, information systems, intelligent data processing, verification.*

UDC 007.52
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/32

Sazonov A.Yu.
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Ladieva L.R.
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Cherednychenko V.I.
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ANALYSIS OF SOFTWARE-LEVEL OPTIMIZATION SOLUTIONS FOR MOBILE WALKING RESCUE ROBOT LOCOMOTION CONTROL SYSTEM

This article will consider potential software-level options for the effective optimization of the four-legged walking robot locomotion control system by implementing optimization criteria parameters with further synthesis of regulators. A comparison of the synthesized control systems with optimal regulators will be presented to identify the best solutions that can be practically implemented to enhance the movement efficiency of the quadruped walking robot. The article will commence with the presentation of the dynamic mathematical model of the servo motor and its subsequent control system synthesis in order to create a sustainable foundation for further analysis of optimization solutions for the control system. The presented servomotor dynamics model will include a detailed derivation of expressions to form the resulting transfer function. Alongside the synthesis of the servomotor's dynamic model, a standard control system for the respective device, based on the obtained transfer function, will be introduced. Then, the synthesized control system will be analyzed from the perspective of optimality. As the next step, the before-presented mathematical model will be converted into the state-space representation form and the optimization criteria will be conducted, which is essential for the synthesis of an optimized solution. Following this, the synthesis of two potential optimization solutions in the form of control system regulators will be introduced. Among the synthesized regulators, two types of optimal regulators will be presented: a linear optimal regulator and a linear-quadratic optimal regulator with an integral component. In the concluding section, a comparative analysis of the obtained results will be conducted, and conclusions will be drawn based on the previous findings.

Key words: *control system, walker, evacuation, optimization, software.*

Introduction. Each year, due to climate change, wars, and humankind population expansion, we increasingly encounter emergencies where terrain becomes the prime obstacle to rescuing people [1, 2, 3]. As a result, standard evacuation means (for example, wheel-based platforms), due to their incapability of traversing complex and uneven terrain, have reduced efficiency under the aforementioned circumstances. Consequently, there is a growing need for mechanisms that can simplify or facilitate evacuation activities when transporting cargo or injured individuals over uneven terrain. One possible solution to this problem is the use of walking robots, which, unlike wheeled devices, are able to traverse complex terrain with extraordinary efficiency by utilizing legs. At the same time, their main disadvantage is speed [4, 6, 7]. To address this issue the solution to enhance locomotion speed by applying software-level optimization to the movement control system is needed.

Analysis of recent research and publications. First and foremost, we shall define the field of analysis. The prime idea of the article is to come up with an effective software-level solution for conventional servomotors in order to enhance their capabilities without any physical modification. Therefore, in the following paragraph, the conventional approach (standard servo motor control methods and their efficiency) shall be analyzed. In such a way we will define their efficiency, from the perspective of time, and enable a substantial basis for further optimization-focused analysis.

Let us begin by deriving the dynamic mathematical model for the servo motor. This step will provide an understanding of the basic principles for unoptimized servomotor control. First and foremost, we shall examine the physical processes occurring in the servomotor (fig. 1) [5, 7, 8, 9, 10, 11].

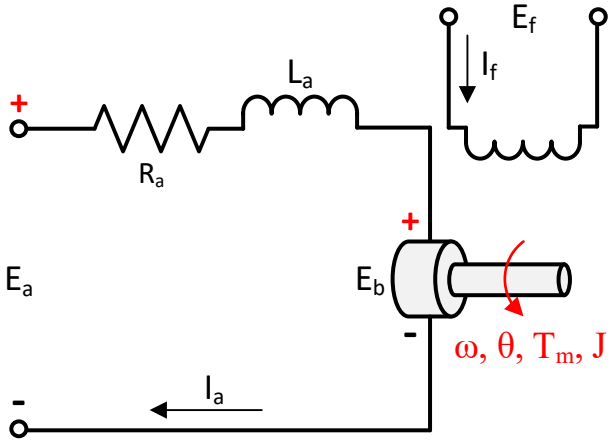


Fig. 1. Electrical diagram of the servomotor [8]

When a control constant voltage E_a is applied to the armature of the servo motor, it rotates and generates a back electromotive force E_b, which is proportional to the motor's speed [8, 9, 10, 11]:

$$E_b = k_a \cdot \theta' = k_a \cdot \omega, \tag{1}$$

where k_a is the proportionality coefficient of the electric field of the servomotor armature.

The differential equation that describes the electrical component of the servomotor will have the form:

$$E_a = R_a \cdot I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E_b, \tag{2}$$

where R_a is the armature resistance; I_a is the current in the motor circuit; L_a s the armature inductance.

The torque T_m, generated by the servo motor is described by the following equation [8, 9, 10, 11]:

$$T_m = k_e \cdot I_a, \tag{3}$$

where k_e is the encoder (positioning sensor) coefficient. Although it is typically provided by the manufacturer, its value can be calculated using the following expression [8]:

$$k_e = \frac{\theta_{max}}{\gamma}, \tag{4}$$

where θ_{max} is the maximum range of the servo motor's rotation angle (working angle); γ s the resolution of the positioning sensor.

Now we shall write an alternative form of the equation (3) [8, 9, 10, 11]:

$$T_m = T + J \cdot \frac{d\omega}{dt} + B_0 \cdot \omega, \tag{5}$$

where J is the moment of inertia of the armature; B_0 is the friction coefficient; T is the engine shaft torque.

Let us perform the Laplace transformation for equations (1), (2), and (3):

$$E_b(s) = k_a \cdot \omega(s); \tag{6}$$

$$E_a(s) - E_b(s) = I_a(s) \cdot (s \cdot L_a + R_a); \tag{7}$$

$$T_m(s) = k_e \cdot I_a(s). \tag{8}$$

Substituting the function (6) into (7) we can find the equation for $I_a(s)$:

$$I_a(s) = \frac{E_a(s) - k_a \cdot \omega(s)}{s \cdot L_a + R_a}. \tag{9}$$

The next step is to perform the Laplace transformation for equation (15):

$$T_m(s) - T(s) = \omega(s) \cdot (s \cdot J + B_0). \tag{10}$$

From equation (10), by substituting equation (8) and performing transformations, we need to obtain the function for $\omega(s)$:

$$\omega(s) = \frac{k_e \cdot I_a(s) - T(s)}{s \cdot J + B_0}. \tag{11}$$

Let us generalize the transfer functions that characterize the processes in the servomotor along the channel «$E_a \rightarrow \omega$»:

$$W_1(s) = \frac{I_a(s)}{E_a(s) - E_b(s)} = \frac{1}{s \cdot L_a + R_a}; \tag{12}$$

$$W_2(s) = \frac{T_m(s)}{I_a(s)} = k_e; \tag{13}$$

$$W_3(s) = \frac{\omega(s)}{T_m(s) - T(s)} = \frac{1}{s \cdot J + B_0}; \tag{14}$$

$$W_4(s) = \frac{E_b(s)}{\omega(s)} = k_a. \tag{15}$$

Now we have all the necessary transfer functions and can obtain the equation for prime transfer function [8, 9, 10, 11]:

$$W(s) = \frac{W_1(s) \cdot W_2(s) \cdot W_3(s)}{1 + W_1(s) \cdot W_2(s) \cdot W_3(s) \cdot W_4(s)} = \frac{k_e}{(s \cdot L_a + R_a) \cdot (s \cdot J + B_0) + k_e \cdot k_a}. \tag{16}$$

Let us write the numerical values of all constants (Table 1). The presented values are relevant to servomotor at our disposal. Therefore, the values in the table may vary depending on which servomotor (or any other electric motor) is utilized. Despite this, the end result figure, in most cases, would maintain a similar shape and relevance.

In the following, by utilizing MATLAB Simulink software environment we will conduct research on the transfer function of the servomotor. For this reason, we will create the corresponding diagram in the abovementioned digital environment (fig. 2).

The diagram includes a previously undefined constant k. This is the conversion coefficient for angular velocity to the SI unit system (revolutions per minute). It is defined as follows [8]:

Table 1

Constants of the servomotor dynamic mode [8]

#	Parameter Name	Symbol	Unit of Measurement	Numerical Value
1	Armature resistance	R_a	Ohms	0,667
2	Armature inductance	L_a	Henries	$0,425 \cdot 10^{-3}$
3	Proportionality coefficient of the electric field	k_a	–	0,3
4	Control voltage	E_a	Volts	8,4
5	Encoder coefficient	k_e	–	0,293
6	Shaft torque of the servomotor	T	kg·cm	2,3
7	Friction coefficient	B	–	0,2
8	Moment of inertia	J	kg·m²	0,01

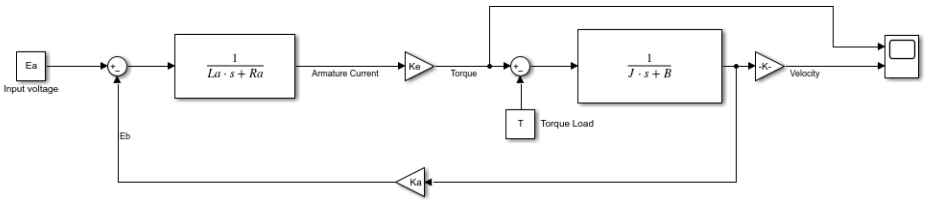


Fig. 2. Servomotor transfer function diagram in the MATLAB Simulink [8]

$$k = \frac{60}{2\pi}. \quad (17)$$

In addition, there is a disturbance T which is the servomotor shaft torque value.

Now we will conduct the transient characteristics for the channel $E_a \rightarrow \omega$ (fig. 3).

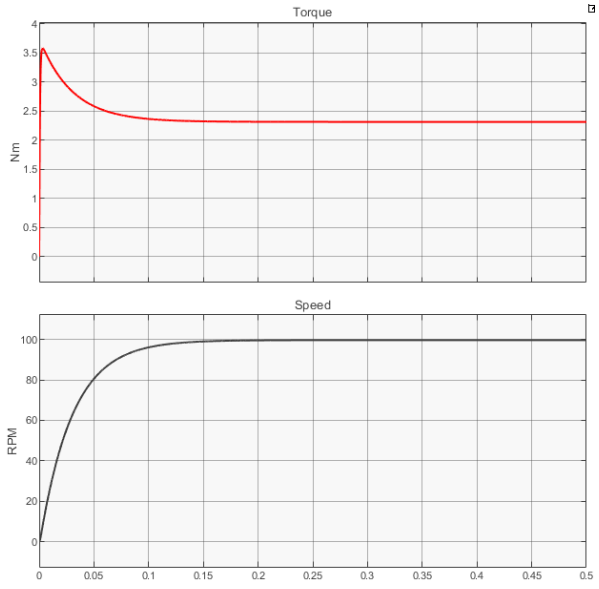


Fig. 3. Transient characteristics of the servo motor [8]

As shown in Figure 3 and in the transformations to obtain the overall transfer function, the value for the torque T can also be obtained from the general function in Figure 2 by placing the output after the proportional link k_a [8, 9, 10, 11].

In Figure 3 it can be seen that the transient process progresses smoothly, and the transport delay is about 0.187 seconds, which is acceptable but not an ideal result for the servo motor [8, 9]. For this reason, the optimization of the control system to minimize the transport delay is required.

The objectives of the article. Synthesize optimization solution for the walking robot servomotor (locomotion) control system to enhance system response time and, therefore, movement capabilities from the perspective of the speed parameter.

Such approach not only will enhance the movement capabilities of any walking robot, but will also enable cost-effective solution which, potentially, can severely reduce the manufacturing cost.

Solution. To solve this problem, we will select an integral quality criterion. According to the conditions stated previously, we include in the optimality criterion the servomotor speed and the shaft torque generated along with the speed:

$$I = \frac{1}{2}\int_0^{t_f}\left(q_{11}\left(\omega - \omega^{task}\right)^2 + q_{22}\left(T - T^{task}\right)^2 + rE_a^2\right)dt \rightarrow min. \quad (18)$$

First, we shall bring the mathematical model to a form that corresponds to the standard representation for a system in state-space.

$$\begin{cases} \dfrac{d(x_1)}{dt} = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + b_1u_1 \\ \dfrac{d(x_2)}{dt} = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + b_2u_2 \end{cases} \quad (19)$$

For this transformation, we will use MATLAB software and built-in transition functions for state-space transformation. But first, we will rewrite the system's transfer function in the form that will be used after the transformation (20).

$$W(s) = \frac{k_e}{s^2 L_a J + s(B_0 L_a + R_a J) + (R_a B_0 + k_e k_a)} \quad (20)$$

Since the topic of this article is the study of optimization methods, the transition to the state space, as mentioned earlier, will be performed using MATLAB software, specifically with the built-in function [A, B, C, D] = ssdata(W) where W is the transfer function of our system, and A, B, C, D are the matrix elements of our transfer function in the state-space. The calculation result is shown in Figure 4.

```
A = 2×2
10^3 ×
   -1.5894   -0.2034
    0.2560         0

B = 2×1
   16
    0

C = 1×2
         0   16.8313

D = 0
```

Fig. 4. Mathematical model converted to the state-space

Thus, the system (1.19) in state space takes the form:

$$\begin{cases} \frac{d(x_1)}{dt} = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + b_1u_1 \\ \frac{d(x_2)}{dt} = a_{21}x_1 \end{cases} \quad (21)$$

For the prime objective, we shall introduce the optimal linear regulator:

$$U(t) = -K(t)X(t); \quad (22)$$

$$K(t) = -R^{-1}BP(t), \text{ де} \quad (23)$$

The given equations define a linear optimal regulator (LOR) with a matrix gain coefficient *K*. This regulator minimizes the criterion along the system's trajectories, whereby:

1. the matrix gain coefficient K can be determined outside the control loop, as it does not depend on either *X* or *U*. To determine K, it is necessary to solve the Riccati equation in reverse time;

2. With constant matrices *A, B, R, Q* and as $t \to \infty$, P approaches a steady-state value, which can be found by solving the algebraic nonlinear matrix equation:

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0, \quad (24)$$

which, in turn, ensures the constancy of the matrix gain coefficient K of the regulator.

We shall introduce the necessary matrices and solve the Riccati equation:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} b_{11} \\ 0 \end{bmatrix}; P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{bmatrix}. \quad (25)$$

To avoid unnecessary calculations and transformations, we will obtain the values of the Riccati equation coefficients in MATLAB software (Figure 5).

```
R = 1
P = 2×2
    0.0007    0.0025
    0.0025    0.0158
```

Fig. 5. Solution for the Riccati Equation

Let us proceed to the creation of an optimal control system that includes a linear-quadratic regulator with an integral component (LQIR). We will directly introduce the derivative of the control signal into the quality criterion:

$$J = \frac{1}{2}X(t_f)^T SX(t_f) + \frac{1}{2}\int_0^{t_f}\left[X^T QX + \left(\frac{dU}{dt}\right)^T R\frac{dU}{dt} + 2X^T N\frac{dU}{dt}\right]dt. \quad (26)$$

In addition, we differentiate the dynamics equation:

$$\frac{d^2X}{dt^2} = A\frac{dX}{dt} + B\frac{dU}{dt}. \quad (27)$$

Variable substitution:

$$V = \frac{dU}{dt}; W_1 = X; W_2 = \frac{dX}{dt}; W = [W_1 \ \vdots \ W_2]^T. \quad (28)$$

Finally, we proceed to the equation:

$$\frac{dW}{dt} = A_1W + B_1V, \quad (29)$$

where

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & \vdots & I \\ \cdots & \vdots & \cdots \\ 0 & \vdots & A \end{bmatrix}; B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ \cdots \\ B \end{bmatrix}. \quad (30)$$

Additionally, we shall make substitution in the quality criterion:

$$J = \frac{1}{2}\left[W^T S_1 W\right]_{t=t_f} = +\frac{1}{2}\int_0^{t_f}\left[W^T Q_1 W + V^T RV + 2W^T NV\right]dt, \quad (31)$$

where

$$Q_1 = \begin{bmatrix} Q & \vdots & 0 \\ \cdots & \vdots & \cdots \\ 0 & \vdots & 0 \end{bmatrix}; S_1 = \begin{bmatrix} S & \vdots & 0 \\ \cdots & \vdots & \cdots \\ 0 & \vdots & 0 \end{bmatrix}. \quad (32)$$

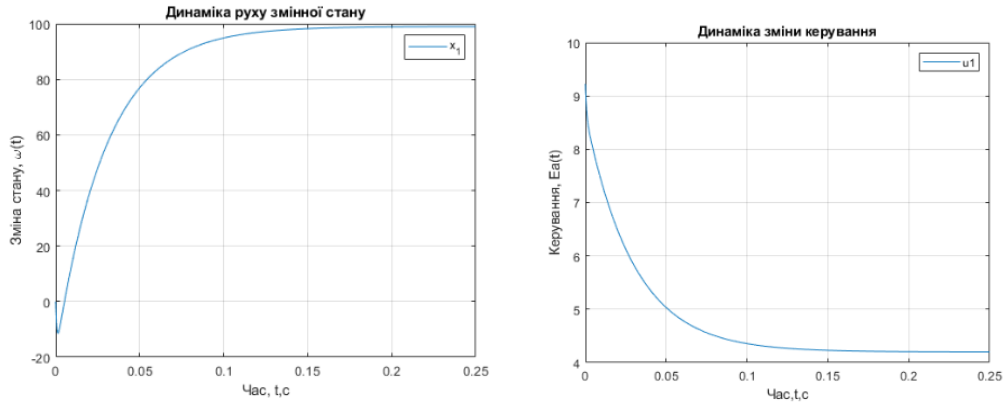


Fig. 5. Result of the LOR Synthesis

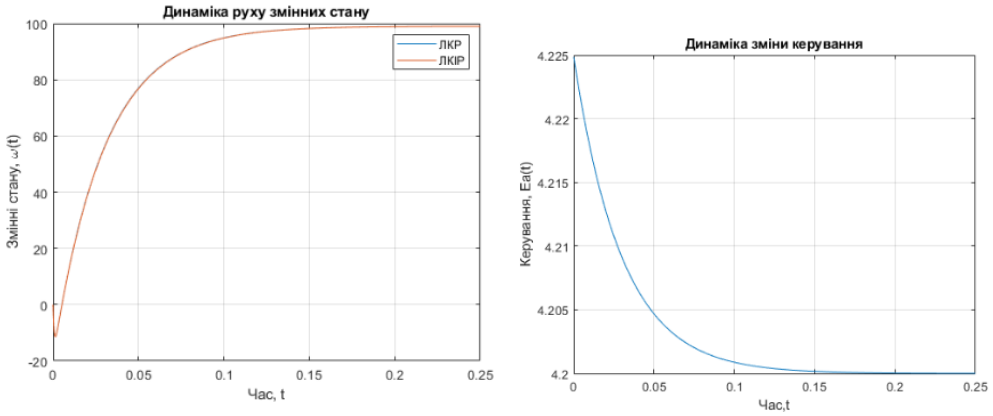


Fig. 6. Result of the LQRI Synthesis and its comparison with the LOR

The expression for optimal control will be as follows:

$$V = -KW = -\begin{bmatrix} K_1 & \vdots & K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_1 \\ \cdots \\ W_2 \end{bmatrix}. \qquad (33)$$

Rewriting using the original variables:

$$U = -K_2 X - \int_0^{\infty} \left(K_1 - \frac{dK_2}{dt} \right) X dt, \qquad (34)$$

we conducting the LQIR regulator.

Taking into account the above-presented equations and information we shall create LOR and LQRI regulators for our system in a digital environment (MATLAB software) and analyze their end effect on the response time. The results are presented in the Figures 5 and 6.

Conclusion. The data presented in Figures 5 and 6 indicates the insignificant difference between the prime result and the optimized one. Further analyzing the provided data, we can clearly indicate the absence of deviation between the two studied regulators. Finally, we incline that not only does any significant reason for the utilization of the more complex LQRI regulator exist but also the ultimate unnecessity of the regulator in general maintains its occurrence.

Bibliography:

1. КОМЕНТАРИИ.UA. Приклад руйнувань у Бородянці. URL: https://kyiv.comments.ua/news/society/developments/9080-v-borodyanke-nachali-razbirat-zavaly-strashno-dazhe-spasatelyam-foto-video.html (дата звернення 06.11.2024).

2. LB.ua. Руйнування школи після ракетного удару по Житомирській області. URL: https://lb.ua/society/2022/03/04/507940_zhitomiri_vorog_vdariv_shkoli.html (дата звернення 06.11.2024).

3. LancsLive URL «Mountain rescuers scrambled to Scafell Pike in dramatic 22-person Lake District operation». URL: https://www.lancs.live/news/local-news/mountain-rescuers-scrambled-scafell-pike-23836020?utm_source=linkCopy&utm_medium=social&utm_campaign=sharebar (дата звернення 06.11.2024).

4. Офіційний сайт bostondynamics. Інформаційна сторінка робота Spot. URL: https://www.bostondynamics.com/products/spot (дата звернення 06.11.2024).

5. Hui Chai. Research and implementation on compliance and force control of hydraulically actuated quadruped robot. Jinan: Shandong University, 2016: 15–18. (in Chinese) DOI:10.1177/1729881418813235

6. He and Gao Chin. J. Mech. Eng. (2020) 33:79 https://doi.org/10.1186/s10033-020-00485-9

7. A Spröwitz, A Tuleu, M Vespignani, et al. Towards dynamic trot gait locomotion: Design, control, and experiments with Cheetah-cub, a compliant quadruped robot. The International Journal of Robotics Research, 2013

8. Чередниченко, В. І. Автоматизація процесу керування стабільністю платформи крокуючого евакуаційного робота: дипломний проект ... бакалавра: 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / Чередниченко Віктор Ігорович. – Київ, 2023. – 81 с.

9. A. Masoud, M. Abu-Ali and A. Al-Shaikhi, "Experimental Determination of an Extended DC Servo-Motor State Space Model: An Undergraduate Experiment," in IEEE Access, vol. 8, pp. 4908-4923, 2020, DOI:10.15676/ijeei.2022.14.3.4

10. X. Wang, W. Wang, L. Li, J. Shi and B. Xie, "Adaptive Control of DC Motor Servo System With Application to Vehicle Active Steering," in IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 24, no. 3, pp. 1054-1063, June 2019, DOI: 10.1109/TMECH.2019.2906250.

11. N. M. Zaki, M. S. Kamel, M. A. ElSheshtawy, R. ElHakim and W. Omran, "Development, Implementation and Control of Active Compliance on Servo Motors in Robotics Applications," 2023 15th International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE), Sydney, Australia, 2023, pp. 442-446, DOI:10.1109/ICCAE56788.2023.10111245

Сазонов А.Ю., Ладієва Л.Р., Чередниченко В.І. АНАЛІЗ ПРОГРАМНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РУХОМ МОБІЛЬНОГО ЕВАКУАЦІЙНОГО РОБОТА

У представленій статті нами буде розглянуто потенційні варіанти ефективної оптимізації, на рівні програмного забезпечення, системи керування рухом чотириногого крокуючого робота за допомогою введення параметрів-критеріїв оптимізації з подальшим синтезом системи керування і відповідних регуляторів. Буде представлене порівняння синтезованих систем керування з оптимальними регуляторами з метою знаходження оптимальних рішень, які можуть бути застосовані у практичному середовищі для покращення ефективності пересування чотириногого крокуючого робота. Стаття розпочнеться з представлення динамічної математичної моделі сервомотору та його системи керування, щоб створити надійний фундамент для подальшого синтезу та аналізу оптимізаційних рішень для системи керування. Представлена модель динаміки серводвигуна міститиме детальне виведення виразів для формування результуючої передатної функції. Окрім виведення динамічної моделі серводвигуна, буде представлено стандартну систему керування відповідним пристроєм, сформовану на основі отриманої передатної функції. Синтезована система керування буде досліджена з точки зору оптимальності. На наступному етапі представлена математична модель буде перетворена у форму простору станів, що є необхідним кроком для синтезу оптимальних регуляторів. Даний етап потрібний для проведення процедури введення критеріїв оптимальності, необхідних для подальшого синтезу оптимізованого рішення. Далі буде представлено синтез двох потенційних рішень оптимізації у вигляді регуляторів системи керування. Серед синтезованих регуляторів буде представлено два види оптимальних регуляторів: лінійний оптимальний регулятор та лінійно-квадратичний оптимальний регулятор з інтегральною складовою. У заключній частині статті нами буде проведено порівняльний аналіз отриманих результатів та створено висновок на їх основі.

Ключові слова: *система керування, крокуючий робот, евакуаційний, оптимізація, програмне забезпечення.*

UDC 004.42
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/33

Fu Bin
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Sarnatskyi V.V.
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A SITUATIONAL AWARENESS SYSTEM BASED ON MULTI-SOURCE SECURITY LOG ANALYSIS

The article is dedicated to the design and implementation of an innovative situational awareness system based on multi-source security log analysis, aimed at small and medium-sized enterprises (SMEs) facing cybersecurity challenges. It is revealed that SMEs, due to limited resources and lack of specialized security personnel, are particularly vulnerable to evolving cyber threats. The article presents a system that integrates log data from multiple security sources within the network, such as firewalls, intrusion detection systems (IDS), and web application firewalls (WAF), utilizing real-time data processing and machine learning techniques to enhance threat detection accuracy. The system leverages advanced algorithms to identify potential security incidents and reduce false positives, thus providing more reliable alerts. It is stated that the system's user-friendly interface simplifies complex security data, making it accessible to non-professional users, and enables them to take proactive actions in response to potential threats.

The article also highlights the system's scalability, which allows it to adapt to various organizational sizes and threat environments, making it suitable for both small enterprises with minimal resources and larger organizations with more complex security needs. The study emphasizes the importance of accessible, intelligent security solutions in closing the cybersecurity gap for SMEs, enabling them to detect, assess, and mitigate threats with greater agility and precision, similar to larger enterprises with dedicated security teams. Moreover, the system is designed to work in real-time, processing large volumes of heterogeneous log data while ensuring high system performance without sacrificing accuracy.

In addition to the primary focus on usability and scalability, the article addresses key challenges in integrating multi-source security logs, improving the speed and accuracy of threat detection, and ensuring the system remains responsive under heavy workloads. By offering a practical solution to SMEs, this research contributes to the ongoing effort to democratize cybersecurity, providing smaller organizations with the tools they need to defend themselves against increasingly sophisticated cyberattacks.

Key words: *Situational Awareness, Multi-source Security Logs, Machine Learning, Data Visualization, Real-time Processing, Cybersecurity.*

Introduction. As the digital age advances, cybersecurity has become a global challenge, especially for SMEs lacking dedicated security personnel. Cyberattacks are increasingly complex, as seen in the WannaCry (2017) and SolarWinds (2020) attacks, exposing weaknesses in traditional, passive security methods. Proactive situational awareness is now essential, allowing quick threat detection and response through multi-source security log integration. While situational awareness models have improved responses, challenges persist in real-time data handling. Enhancing detection accuracy and speed with advanced data integration and machine learning remains a crucial research focus.

The main contributions of this paper are summarized as follows:

– Realizes the effective integration and real-time processing of multi-source security log data;

– Improved threat detection accuracy based on machine learning and reduced false positives;

– Provides a friendly interface for non-professional users;

– Provides practical solutions for small and medium-sized enterprises to deal with network security challenges.

Formulation of the Problem. The increasing complexity of cybersecurity threats, coupled with a rise in digital dependency, has made threat detection more challenging, especially for small and medium-sized enterprises (SMEs) that often lack dedicated security teams and expertise. Existing security approaches, primarily rule-based methods, struggle to handle

evolving threats effectively. This gap makes SMEs particularly vulnerable to cyber incidents, potentially leading to financial losses, data breaches, and reputational harm. The challenge lies in developing a system that provides both robust and adaptable threat detection capabilities while remaining accessible to non-professional users [1, p. 972].

Analysis of Recent Research and Publications. Significant progress has been made in threat detection through advanced technologies like machine learning and multi-source log analysis. Many situational awareness systems integrate security logs from multiple sources and apply machine learning for enhanced threat detection. However, limitations persist. Most systems face challenges in managing large volumes of heterogeneous data and ensuring real-time threat response without compromising performance. Furthermore, many existing solutions lack user-friendly interfaces, which limits their accessibility for non-professional users, especially within SMEs. This study aims to address these limitations by developing a situational awareness system with a focus on usability, accuracy, and scalability.

Task statement. The aims of this research is to design and implement a situational awareness system based on multi-source security log analysis, which can realize real-time detection and response of network threats by integrating log data and machine learning technology, especially for small and medium-sized enterprises that lack professional security personnel.

Outline of the Main Material of the Study. The system architecture comprises multiple layers for data processing and analysis:

Data Collection Layer: Gathers security logs from sources like firewalls, IDS, and WAF, using Apache Kafka for high-throughput, low-latency data streaming [2, p.40].

Data Preprocessing and Integration Layer: Cleans, normalizes, and unifies log data formats with tools like Logstash to ensure data integrity and compatibility. Big Data Analysis Layer: Uses machine learning models (e.g., decision trees, random forests, isolation forests) with Apache Spark for real-time and batch threat analysis, supporting incident tracking.

Data Storage Layer: Employs a hybrid database with PostgreSQL for structured data, MongoDB for unstructured data, and Elasticsearch for real-time indexing and search.

Visualization and User Interface Layer: Offers a user-friendly interface with Kibana and ECharts, enabling non-professional users to monitor security status through dashboards, charts, and threat maps.

Unresolved issues. Although existing research has made significant progress in threat detection and log analysis, there is still considerable room for improvement in efficient integration of multi-source security logs and real-time threat response capabilities. Specifically, how to process a large amount of heterogeneous log data and use machine learning models to improve detection efficiency without sacrificing system performance is a major problem in current research. In addition, most existing situational awareness systems are not friendly to non-professional users, which makes it difficult for small and medium-sized enterprises to respond quickly when faced with complex network security challenges.

Article objectives. In response to the above unresolved issues, this study aims to develop a situational awareness system based on multi-source security log analysis, which integrates security log data from multiple sources and applies advanced machine learning algorithms to achieve real-time detection and response to network threats. At the same time, this system is specially designed for non-professional users, providing an intuitive and easy-to-use visual interface to help small and medium-sized enterprises effectively manage their network security threats in the absence of professional security personnel.

1. System architecture design

The architecture design of the situational awareness system is divided into multiple levels, covering the entire process from data collection, processing, analysis to visualization. Each level provides support for the overall function of the system, ensuring that the system can efficiently and in real time process security log data from multiple sources and provide users with an easy-to-understand threat visualization interface [7, p. 521].

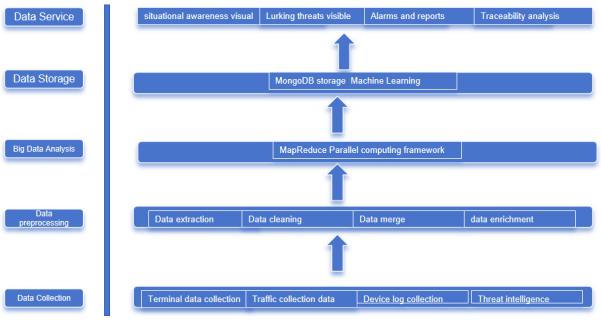


Fig. 1. Layered architecture diagram of the software

1.1 Data Collection Layer

The data collection layer is responsible for collecting security log data from various security devices, such as firewalls, intrusion detection systems

(IDS), web application firewalls (WAF), etc. The logs generated by these devices are usually in different formats. The collection process is implemented through mechanisms that support multiple interfaces (such as Syslog, RESTful API, WebSocket, etc.) to ensure that the system can handle logs of different formats and sources. In order to ensure the stability of data collection, the system uses Apache Kafka, a high-throughput, low-latency distributed data streaming platform. Kafka can not only process large amounts of data in real time, but also support the horizontal expansion of the system to cope with the growth of data volume in the future [3, p. 66].

1.2 Data Preprocessing and Integration Layer

After log data collection, it moves to the data preprocessing and integration stage, which includes data cleaning, normalization, and format unification. Given the varied structure and content of logs from different security devices, preprocessing aims to remove redundant data, resolve inconsistencies, and standardize log formats to enable accurate analysis.

Tools like Logstash are employed for initial log collection and preprocessing. The cleaned and standardized data is then stored in a unified database for further analysis. This preprocessing ensures data integrity and consistency, enhancing the accuracy of subsequent threat detection [4, p. 67].

– The data processing workflow for this platform consists of several key stages:

– Data Collection: Metadata from probes enters via ETL tools, while third-party security data is collected and processed through Logstash.

– Data Caching: All security data is cached using Kafka's message queue to facilitate efficient data flow.

– Data Processing: UEBA and machine learning models leverage the platform's Flink engine for security data analysis [7, p. 2].

– Data Storage: Raw logs and traffic data from probes and third-party devices are stored in Elasticsearch (ES), while processed security events are saved in MongoDB.

– Data Retrieval: After Logstash normalizes log data, it sends it to both ES and Kafka. Flink then pulls data from Kafka for correlation analysis, with resulting security events and asset data stored in MongoDB.

MongoDB supports security events, asset, and vulnerability data, handling unstructured data (like JSON) flexibly. While ES excels in full-text search, MongoDB is preferable for updates due to its adaptability and support for unstructured data management.

1.3 Big Data Analysis Layer

After preprocessing, data enters the big data analysis layer, where Apache Spark is used for large-scale, real-time, and offline threat analysis. This layer integrates machine learning models (e.g., decision trees, random forests, isolation forests) to boost detection accuracy and speed. Threat intelligence sources also contribute to identifying new threats and generating real-time alerts.

Apache Spark supports both real-time detection and batch processing for historical data, essential for incident tracing and trend analysis. Through multi-source data integration, the system generates detailed security reports, helping organizations understand their security posture and potential risks.

1.4 Data Storage Layer

The system uses a hybrid database architecture to store diverse security log data. Structured metadata (e.g., timestamps, event types) is stored in PostgreSQL for efficient querying and data consistency, while unstructured log data is stored in MongoDB, suited for large volumes of detailed logs and events.

Additionally, real-time data indexing in Elasticsearch enables fast, full-text search and analysis, facilitating quick retrieval and investigation of security events. This combination of SQL, NoSQL, and Elasticsearch optimizes storage, query efficiency, and supports incident investigation effectively.

1.5 Visualization and User Interface Layer

To ensure ease of use for non-professional users, the system's interface prioritizes intuitive

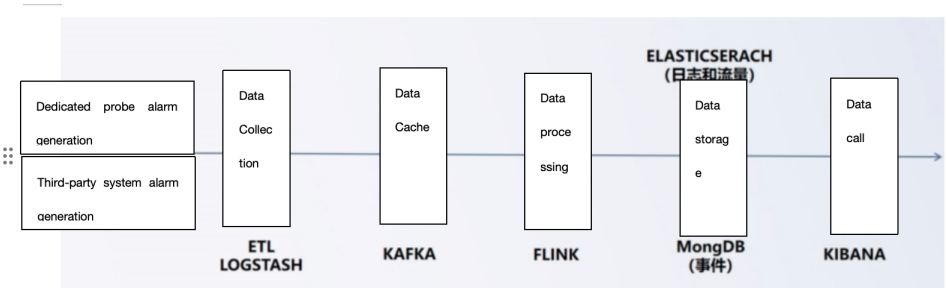


Fig. 2. Overall data processing flow

visualization. Using tools like Kibana and ECharts, data is displayed as charts, dashboards, and threat maps, allowing users to quickly grasp network security status [8, p. 71].

Kibana enables real-time views of network activity, traffic, security events, and threat severity, with interactive dashboards for in-depth event exploration. ECharts efficiently generates visual charts, helping users analyze and interpret complex data [7, p. 520].

The system interface supports customization, allowing users to set monitoring parameters based on their security needs. SMEs may focus on external threats, while large enterprises may monitor internal traffic and multiple devices. This flexibility enables users to track and address key security issues effectively.

2. Machine learning for threat detection

In today's complex network security landscape, machine learning has become essential for threat detection. Unlike static, rule-based methods, machine learning can dynamically identify abnormal patterns and detect novel threats by learning from historical data. This system integrates advanced machine learning algorithms to handle various network attacks, enhancing accuracy and efficiency across data preprocessing, real-time detection, and model optimization stages [5, p. 2].

2.1 Application of machine learning algorithms

The system utilizes core machine learning algorithms – decision trees, random forests, and isolation forests – each tailored for specific threat detection needs, enhancing accuracy and efficiency across network environments:

– **Decision Tree:** Identifies abnormal traffic patterns, supporting interpretable detection logic.

– **Random Forest:** Uses multiple trees to reduce overfitting, improve stability, and handle high-dimensional data, aiding in complex attack detection.

– **Isolation Forest:** Targets anomaly detection, isolating outliers to identify unusual behaviors like large data transfers or frequent logins.

Together, these algorithms detect diverse threats (e.g., DDoS, network scans, Trojan propagation) and, through continuous training, adapt to evolving attack patterns for effective, ongoing threat detection.

2.2 Real-time threat detection and response

The system enables real-time threat detection by integrating Apache Kafka and Spark Streaming for instant processing of large-scale log data. Kafka collects data from multiple security devices, while Spark Streaming rapidly analyzes it in micro-batches, supporting near-instant detection crucial for quick-response attacks like DDoS.

Machine learning models classify and analyze incoming logs in real time. On detecting abnormal behavior, the system immediately alerts security managers and can automate responses (e.g., IP blocking, access restriction) to swiftly contain threats. This automation minimizes response delays, bolstering network security continuity.

Threat classification and ranking: Based on the analysis results of the machine learning model, the system can classify and rank threats. For example, a DDoS attack is marked as a high-risk threat, while some low-frequency anomalous network traffic may only be marked as a medium or low-risk threat. According to different threat levels, the system will automatically take corresponding protective measures to ensure reasonable allocation of resources and prioritize high-risk threats.

Fig. 3. 3D display of network attack situation

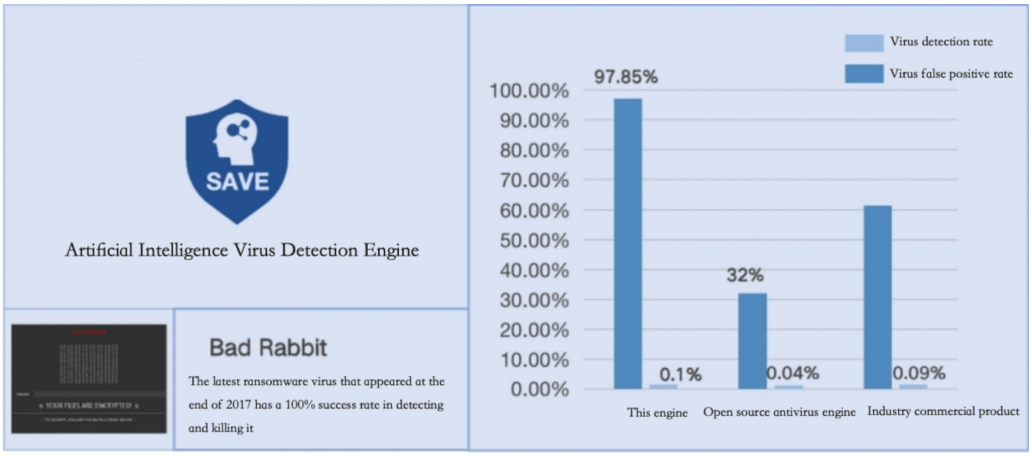


Fig. 4. Machine learning model detection success rate

2.3 Performance optimization

To handle large-scale log data processing, the system focuses on model optimization and efficient resource management.

– **Hyperparameter Tuning and Feature Selection:** Automated hyperparameter tuning and feature selection reduce computational costs, improve training speed, and enhance model performance by removing unnecessary input features.

– **Dimensionality Reduction:** Techniques like PCA (Principal Component Analysis) lower data dimensionality, speeding up calculations while retaining essential data features, enhancing model efficiency with network traffic and security logs.

– **Continuous Learning:** Regular retraining with new data enables the model to adapt to evolving attack patterns, improving detection accuracy and controlling false positives and negatives.

– **Parallel Computing and Distributed Architecture:** A distributed computing setup allows simultaneous log analysis across devices, preventing bottlenecks. Kafka and Spark Streaming support dynamic scaling, adjusting resources as network traffic fluctuates.

This approach ensures real-time, efficient threat detection in complex environments.

3. Real-time data processing

Real-time data processing is a core component of the situational awareness system, which ensures that the system can respond quickly when threats occur. The design of this part not only requires the system to have the ability to process massive amounts of data, but also must ensure low latency so that immediate action can be taken when anomalies are found. The following are the specific technologies and processes for real-time data processing:

3.1 Real-time data streaming and collection

The system uses Apache Kafka for real-time, high-throughput, low-latency data stream processing, ideal for large-scale, multi-source security log data from firewalls, intrusion detection systems, and more. Kafka's partitioning and replication features enable scalability and data reliability under increasing data loads [4, p. 71].

Kafka's data flow mechanism supports parallel processing by distributing logs to multiple nodes, enhancing processing efficiency and maintaining data integrity. Additionally, Kafka's publish/subscribe model allows security managers to monitor specific log types or sources, increasing system flexibility.

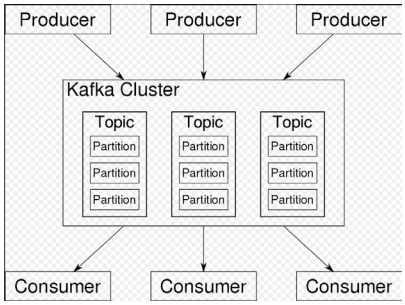


Fig. 5. Schematic diagram of data flow with Apache Kafka at the core

3.2 Data Preprocessing and Filtering

When data enters the system via Kafka, it undergoes preprocessing to standardize diverse log formats for analysis. Key steps include:

Data Cleaning: Removing redundant, duplicate, and invalid entries to ensure accuracy.

Formatting: Converting logs into a uniform structure, like structured tables or JSON.

Data Enhancement: Adding contextual information through correlation, such as linking login logs with network traffic to identify threats.

This preprocessing boosts analysis efficiency, minimizes resource use, and enhances system response speed.

3.3 Real-time data analysis and threat detection

After preprocessing, the system uses Apache Spark Streaming for real-time data analysis, detecting abnormal behaviors and potential threats with low latency. By integrating machine learning models (e.g., random forests and isolation forests), Spark Streaming enables complex pattern recognition to identify unusual network traffic, intrusions, and attacks. Spark's powerful computing allows rapid threat detection and instant alerts.

At the same time, the system also supports the continuous learning of machine learning models. By regularly updating training data, the model can continuously adapt to new network attack patterns and improve the accuracy of detection. In addition, the system also adopts a feedback mechanism to optimize the model based on user feedback and reduce the false alarm rate.

3.4 Real-time event correlation and alarm

In the data analysis phase, the system enhances threat detection by correlating log events from multiple sources, providing a comprehensive security view. For example, correlating multiple failed login attempts in firewall logs with abnormal traffic in intrusion detection logs can reveal a potential brute force attack. This multi-source correlation reduces missed detections and improves threat detection accuracy.

Upon confirming a threat, the system triggers a real-time alarm displayed on the dashboard and notifies security managers via email or SMS. For severe threats, automated responses can be executed, such as blocking IPs, closing ports, or isolating affected devices.

3.5 Real-time data storage and retrieval

The system uses a hybrid database architecture for data persistence and fast retrieval:

PostgreSQL: Stores structured data (e.g., timestamps, event types) for complex queries.

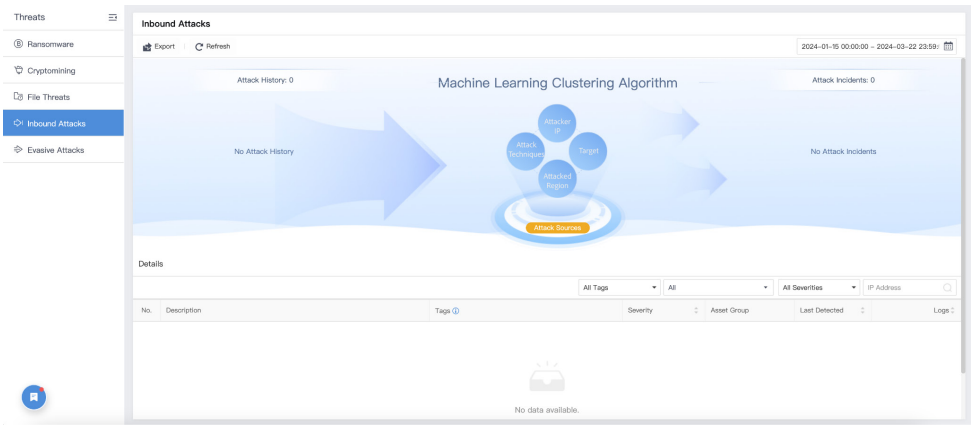


Fig. 6. Network Security Threat Detection

Fig. 7. Risk host event correlation analysis diagram

MongoDB: Handles large volumes of unstructured or semi-structured data like network traffic logs.

Elasticsearch: Enables real-time indexing and full-text searches, supporting rapid security investigations and responses.

3.6 Scalability and performance optimization

To handle increasing data volumes and network scale, the system is built for high scalability. Kafka and Spark offer horizontal scalability, allowing processing nodes and data partitions to be added as needed. As data traffic grows, the system dynamically scales to maintain efficiency under heavy loads.

With load balancing, data processing tasks are evenly distributed across nodes to prevent overload. Continuous pipeline optimization via performance monitoring ensures low latency and high throughput. In tests, the system maintained millisecond response times while processing millions of log records, demonstrating its practicality for large-scale networks.

4. System evaluation and optimization

After developing and deploying a situational awareness system based on multi-source security log analysis, the system's performance, accuracy, and availability need to be rigorously evaluated and optimized to ensure its stability and effectiveness in practical applications. The following sections detail the system's evaluation process, optimization strategies, and performance in different network environments.

4.1 Assessment of Threat Detection Accuracy

The system's threat detection algorithms were rigorously tested in real-world scenarios, focusing on key performance metrics:

Detection Accuracy: Achieving a 93% accuracy rate, the system consistently surpasses traditional rule-based methods, validated against annotated log data.

False Positives and False Negatives: Tests across multiple attack types (e.g., DDoS, SQL injection, brute force) yielded an optimized false positive rate of ~5% and a false negative rate of 2% [6, p. 10].

A feedback mechanism enables continuous refinement through security manager input, reducing false alarms and enhancing detection accuracy as network conditions evolve.

4.2 System Performance Evaluation

The system's performance is measured by response speed and throughput in processing large-scale log data, tested under varying loads:

Processing Throughput: The system, leveraging Apache Kafka and Spark Streaming, can handle over one million log entries per second with processing latency under 50 milliseconds, maintaining efficiency even under high loads.

Data Latency: For real-time data processing, latency impacts response speed to security incidents. Tests reveal that, even with heavy data traffic, average latency remains at the millisecond level. Optimizations in Kafka's data transmission and Spark's computing model effectively minimize latency, ensuring rapid incident detection and response.

4.3 Usability and User Feedback

The system is designed for usability, particularly for non-professional users, with its interface refined through extensive testing and feedback. Key aspects include:

User-Friendliness: Security information is displayed via dashboards, charts, and threat visuals, with customizable monitoring views through simple drag-and-drop features. Tests indicate that over 90% of users find the interface intuitive and easy to use, allowing even non-technical users to quickly become proficient.

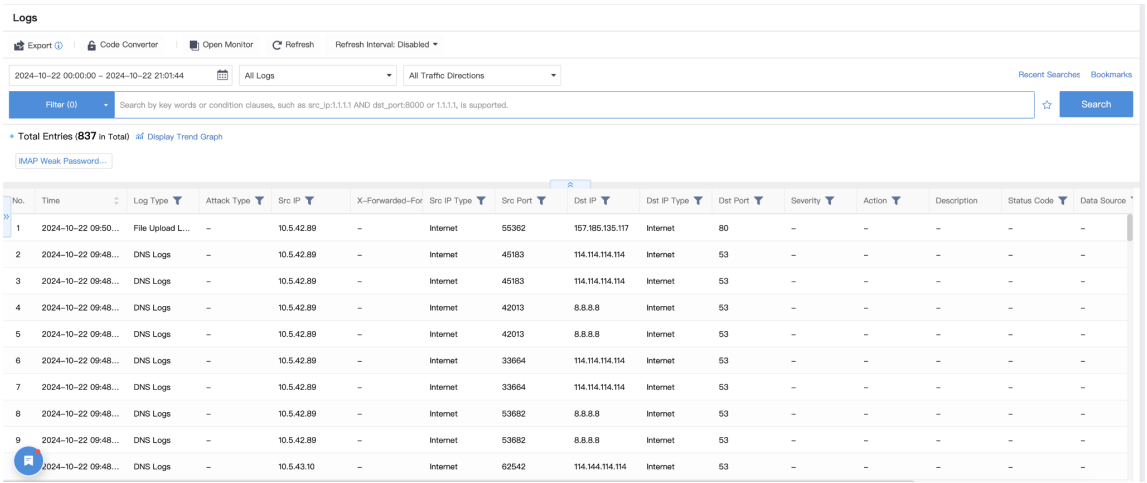


Fig. 8. Real-time data indexing and retrieval

Customizability: To meet the needs of different enterprises and organizations, the system allows users to customize the interface according to the security areas they are concerned about, such as monitoring specific devices or specific attack types. Users can flexibly set different warning conditions based on network conditions to obtain targeted protection measures. User feedback shows that this feature improves the practicality and flexibility of the system.

Response time and ease of operation: Another point of concern in user feedback is the system's response time when generating alerts and handling events. Tests show that the system is able to generate alerts within seconds of detecting threats and immediately execute preset protective measures, such as blocking suspicious IP addresses or blocking attack paths. In actual operation, users believe that the system can respond to emergencies quickly without cumbersome manual intervention.

4.4 System Optimization Strategy

The system has been optimized to enhance stability, response speed, and accuracy based on testing and user feedback. Key optimizations include:

Model Optimization: The system regularly updates training data and employs feature selection, dimensionality reduction, and Ensemble Learning, combining multiple model predictions to improve detection accuracy and stability while reducing computational load.

Resource Management and Allocation: Dynamic resource allocation adjusts processing nodes based on network traffic, preventing bottlenecks during peak loads. Load balancing distributes tasks evenly to avoid overloading any single node.

System Monitoring and Log Analysis: An internal monitoring module tracks performance and resource usage in real time, automatically adjusting resources when performance declines. Detailed log analysis

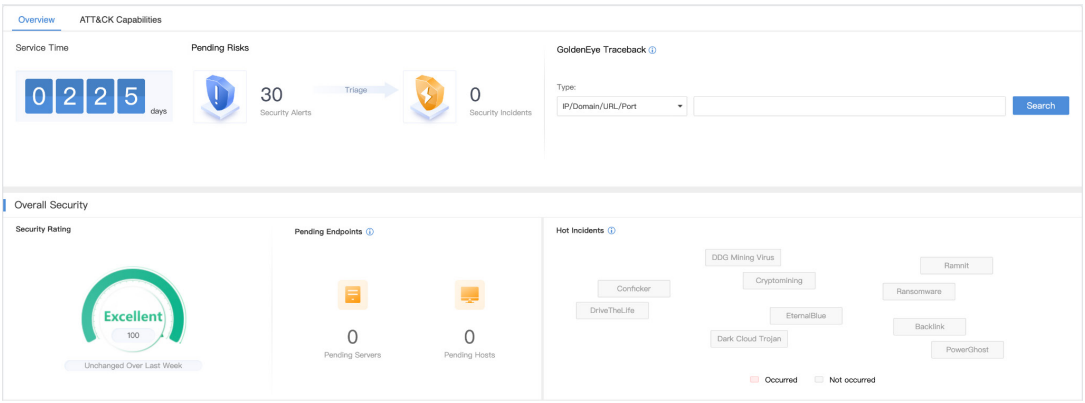


Fig. 9. Network security threat information display overview diagram

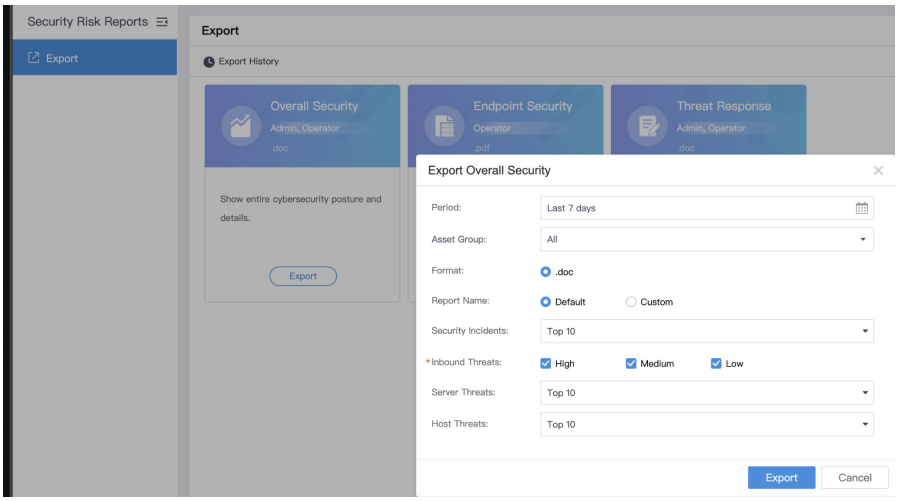


Fig. 10. Security Risk Reports

provides insights into system status, enhancing stability and guiding further optimizations.

Conclusions. This research presents a situational awareness system that enhances network threat detection and response capabilities for SMEs. By integrating multi-source log data and leveraging advanced machine learning algorithms, the system delivers accurate and timely detection of complex threats. The user-friendly interface ensures accessibility for non-professional users, enabling SMEs to manage network security effectively and proactively. Experimental results demonstrate the system's scalability, processing large-scale log data efficiently and reducing security incident frequency and impact.

Future Prospects. The study identifies several areas for future research:

Incorporation of Deep Learning: Future iterations of the system could leverage deep learning to improve the detection of advanced persistent threats (APTs) and adapt to evolving attack patterns more effectively [9, p. 2].

Privacy Protection and Compliance: As data privacy becomes more critical, future work should focus on integrating privacy-preserving techniques, such as Federated Learning, while ensuring compliance with GDPR, CCPA, and other data privacy regulations [10, p. 108].

Scalability and Adaptability: To accommodate larger networks and multi-data center architectures, the system's scalability should be enhanced. Future research could explore strategies to balance localized and global threat detection capabilities in complex environments.

Bibliography:

1. Y. He. Research on the Key Technology of Network Security Based on Machine Learning. *2021 6th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP)*, Xi'an, 2021. P. 972-975. DOI: 10.1109/ICSP51882.2021.9408756.

2. Z. Yifan, Application of Machine Learning in Network Security Situational Awareness, *2021 World Conference on Computing and Communication Technologies (WCCCT)*, Dalian, 2021. P. 39-46, DOI: 10.1109/WCCCT52091.2021.00015.

3. Y. Zhong, S. Wang, Research and Design of Visual Analytics System of Network Security Situation Based on Multi-source Log, *2020 7th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE)*, Changsha, 2020. P. 1095-1099, DOI: 10.1109/ICISCE50968.2020.00223.

4. A. Benzekri, R. Laborde, A. Oglaza, D. Rammal and F. Barrère, Dynamic security management driven by situations: An exploratory analysis of logs for the identification of security situations, *2019 3rd Cyber Security in Networking Conference (CSNet)*, Quito, 2019. P. 66-72, DOI: 10.1109/CSNet47905.2019.9108976.

5. H. Tao, J. Zhou, S. Liu, A survey of network security situation awareness in power monitoring system, *2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, Beijing, 2017. P. 1-3, DOI: 10.1109/EI2.2017.8245487.

6. M. Wurzenberger, G. Höld, M. Landauer, F. Skopik. Analysis of statistical properties of variables in log data for advanced anomaly detection in cyber security. Computers & Security, 2023. V. 137.

7. E. Novikova and I. Kotenko, Analytical Visualization Techniques for Security Information and Event Management, *2013 21st Euromicro International Conference on Parallel, Distributed, and Network-Based Processing*, Belfast, 2013. P. 519-525, DOI: 10.1109/PDP.2013.84.

8. I. Sharafaldin, A. Habibi Lashkari, Ali A. Ghorbani. An Evaluation Framework For Network Security Visualizations. Computers & Security. Computers & Security, 2019. V. 84, P. 70-92, DOI:10.1016/j.cose.2019.03.005.

9. S. S. Karim, M. Afzal, W. Iqbal, D. Al Abri. Advanced Persistent Threat (APT) and intrusion detection evaluation dataset for Linux systems 2024. Data in Brief, 2024. V. 54, DOI: 10.1016/j.dib.2024.110290.

10. Y. -S. Martin, A. Kung, Methods and Tools for GDPR Compliance Through Privacy and Data Protection Engineering, *2018 IEEE European Symposium on Security and Privacy Workshops (EuroS&PW)*, London, 2018, P. 108-111, DOI: 10.1109/EuroSPW.2018.00021.

Фу Бінь, Сарнацький В.В. РОЗРОБКА ТА ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ СИТУАЦІЙНОЇ ОБІЗНАНОСТІ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ЖУРНАЛІВ БЕЗПЕКИ З ДЕКІЛЬКОХ ДЖЕРЕЛ

Стаття присвячена розробці та впровадженню інноваційної системи ситуаційної обізнаності на основі аналізу журналів безпеки з декількох джерел, орієнтованої на малі та середні підприємства (МСП), які стикаються з проблемами кібербезпеки. Виявлено, що МСП через обмежені ресурси та відсутність спеціалізованого персоналу з безпеки є особливо вразливими до нових кіберзагроз. У статті представлено систему, яка інтегрує дані журналів з декількох джерел безпеки в мережі, таких як брандмауери, системи виявлення вторгнень (IDS) та брандмауери веб-додатків (WAF), використовуючи обробку даних у режимі реального часу та методи машинного навчання для підвищення точності

виявлення загроз. Система використовує передові алгоритми для виявлення потенційних інцидентів безпеки та зменшення кількості помилкових спрацьовувань, забезпечуючи таким чином більш надійні оповіщення. Зазначається, що зручний інтерфейс системи спрощує складні дані про безпеку, роблячи їх доступними для непрофесійних користувачів, і дозволяє їм вживати проактивних заходів у відповідь на потенційні загрози.

У статті також підкреслюється масштабованість системи, яка дозволяє їй адаптуватися до різних розмірів організацій і середовищ загроз, що робить її придатною як для малих підприємств з мінімальними ресурсами, так і для більших організацій з більш складними потребами в безпеці. Дослідження підкреслює важливість доступних, інтелектуальних рішень у сфері безпеки для подолання прогалин у кібербезпеці малих і середніх підприємств, які дозволяють їм виявляти, оцінювати та зменшувати загрози з більшою швидкістю та точністю, як це роблять великі підприємства зі спеціалізованими командами безпеки. Крім того, система розроблена для роботи в режимі реального часу, обробляючи великі обсяги різнорідних даних журналів, забезпечуючи при цьому високу продуктивність системи без шкоди для точності.

На додаток до основного акценту на зручність використання і масштабованість, в статті розглядаються ключові проблеми інтеграції журналів безпеки з різних джерел, підвищення швидкості і точності виявлення загроз, а також забезпечення швидкої реакції системи в умовах високих робочих навантажень. Пропонуючи практичне рішення для МСП, це дослідження робить свій внесок у постійні зусилля з демократизації кібербезпеки, надаючи невеликим організаціям інструменти, необхідні для захисту від все більш витончених кібератак.

Ключові слова: *Ситуаційна обізнаність, багатоджерельні журнали безпеки, машинне навчання, візуалізація даних, обробка в реальному часі, кібербезпека.*

УДК 004.056
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/34

Цяпа С.М.
Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України

ЗАГРОЗИ ТА ВРАЗЛИВОСТІ КІБЕРБЕЗПЕКИ В МЕРЕЖЕВИХ ТА АВТОНОМНИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМАХ

Стаття присвячена дослідженню загроз кібербезпеки, пов'язаних з мережевими та автономними транспортними засобами (CAV) – ключовим напрямком розвитку автомобільної промисловості. CAV мають потенціал покращити транспортну галузь, забезпечуючи підвищену безпеку дорожнього руху, покращену доступність та ефективність перевезень. Незважаючи на значний прогрес у розвитку CAV систем, питання їхньої кібербезпеки залишається актуальним. Зростання кількості мережевих пристроїв та підвищення складності систем управління CAV створюють нові можливості для кібератак, які можуть призвести до серйозних наслідків. У статті розкривається критична роль датчиків і мережевих комунікацій у вдосконаленні автомобільної інфраструктури, зменшенні заторів і аварійності, а також у створенні єдиної транспортної системи. Незважаючи на очевидні переваги цих технологій, у статті визначено, що загрози кібербезпеки становлять значні ризики для безпеки та ефективності CAV. З'ясовано, що зростаюча інтеграція автоматизованих і мережевих систем розширює можливості для злочинних суб'єктів використовувати вразливості, ставлячи під загрозу безпеку CAV. Для вирішення цієї проблеми у дослідженні проводиться класифікація загрози кібербезпеці на чотири окремі групи: атаки на VANET мережу транспортного засобу; атаки, спрямовані на інфраструктуру сенсорів; атаки спрямовані на апаратне забезпечення та зловмисні атаки. Ці класифікації відповідають різним комунікаційним мережам і системам, на які націлені зловмисники. У статті також розкривається потенціал ескалації кібератак, як додаткової загрози, характерної для взаємопов'язаного середовища CAV. Розглядаються сучасні стратегії протидії, призначені для захисту цих транспортних засобів. Розкриваючи ключові моменти, стаття заглиблюється в атаки супротивника на автономні транспортні засоби, висвітлюючи їхні наслідки і підкреслюючи нагальну потребу в більш комплексних захисних механізмах. Наголошується, що подальші дослідження в напрямку підвищення кібербезпеки транспортних засобів, а також суміжної інфраструктури сприятимуть підвищенню безпеки в цілому, підвищенню універсальності CAV та забезпеченню відповідності новим вимогам сучасних транспортних систем.

Ключові слова: *мережеві та автономні транспортні засоби, автомобільна мережа, кібератаки, захист автотранспорту, кіберфізичні системи.*

Постановка проблеми. Протягом останнього десятиліття автомобільна індустрія пережила суттєвий технологічний прорив, що змінив традиційне уявлення про безпеку транспортних засобів. Сучасні автомобілі інтегрують складні системи, які поєднують механічні, електронні та програмні компоненти. Зростання кількості електронних пристроїв і використання бездротових технологій суттєво підвищили рівень автоматизації й підключення транспортних засобів. Водночас зростає популярність створення транспортних мереж (VN – vehicular networks) [1] і мережевих автономних транспортних засобів (CAV – connected and autonomous vehicles) [2], що відкриває нові можливості для підвищення ефективності та безпеки, але водночас створює серйозні загрози кібербезпеці. Розвиток CAV характеризується стрімким зростанням глобального ринку. Очікується, що до 2050 року ринкова вартість цього сегмента досягне 7 трильйонів доларів США [3]. Інтенсивна конкуренція між провідними автовиробниками й технологічними компаніями стимулює дослідження й упровадження нових підходів до створення автономних транспортних засобів. Різноманітні дослідницькі програми, що реалізуються на міжнародному рівні, акцентують увагу на важливому економічному та соціальному потенціалі мережевих та автономних транспортних засобів (CAV). Однак поряд із перевагами, такими як оптимізація логістики, зменшення викидів і підвищення рівня безпеки на дорогах, мережеві й автономні транспортні системи створюють значні загрози, пов'язані із захистом конфіденційності, цілісності та доступності інформації [4]. Головною загрозою для CAV є кібербезпека. Підвищення рівня підключення транспортних засобів до мережі збіль-

шує ризик несанкціонованого втручання в їхню роботу. Зловмисники можуть взяти під контроль автомобіль або його аксесуари, отримати доступ до конфіденційних даних користувачів чи змінити цілісність переданих даних. Вважається, що основними векторами атак стають бездротові технології зв'язку та обмін даними. Проблеми безпеки CAV зосереджуються на трьох ключових аспектах: захист конфіденційності користувацьких даних, забезпечення цілісності переданих і отриманих даних, а також безпеці електронних блоків управління (ECU – electronic control units) [5]. Сучасні стандарти в автомобільних системах зв'язку та обміну даними часто не відповідають усталеним нормам кібербезпеки, що зумовлено обмеженнями апаратного забезпечення та змінами в мережевій архітектурі. Недостатній захист хоча б одного компонента системи може викликати суттєві порушення безпеки, що ставить під загрозу як сам автомобіль, так і його користувачів. Актуальність досліджень кібербезпеки мережевих транспортних засобів обумовлена зростаючим числом кіберзагроз і складністю атак, які з часом стають дедалі витонченішими. З метою досягнення безпечного використання CAV необхідно розробляти нові методи захисту, враховуючи сучасні вразливості та способи їх подолання. Безпечні транспортні засоби є ключовим компонентом для успішного впровадження сервісів CAV і подальшого розвитку транспортних мереж.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Очікується, що майбутні мережеві та автономні транспортні засоби досягнуть високого рівня автоматизації, а основні функції водіння повністю контролюватимуться сучасними системами. Хоча цей прогрес надає значні переваги, він також створює широкий спектр вразливостей у сфері безпеки та конфіденційності. Зростаюча взаємопов'язаність цих транспортних засобів створює нові можливості для зловмисників використовувати слабкі місця системи. Задокументовані випадки кібератак на мережеві транспортні засоби спричинили значні відкликання та змусили виробників посилити протоколи безпеки.

Результати недавніх досліджень свідчать про суттєві успіхи у виявленні та аналізі загроз безпеці, що стосуються мережевих і автономних транспортних систем. В дослідженні [6] увага приділяється аналізу вразливостей систем допомоги водієві (ADAS – advanced driver assistance systems) при атаках на мережу CAN (controller area network). Автори показують, що шляхом маніпуляції даними в мережі CAN можливо порушити функціональність адаптивного круїз-контролю (ACC – adaptive cruise control), що потенційно може призвести до небезпечних ситуацій на дорозі. У своєму дослідженні вони використовували промислове програмне рішення для ADAS, пропонуючи практичне розуміння вразливостей, пов'язаних з комунікаціями по шині CAN, та їхніх наслідків для систем, критично важливих для безпеки. У роботах [7, 8] автори досліджували архітектурний дизайн та інтеграцію різних сенсорних систем в автономних транспортних засобах (AVs – autonomous vehicles). Їхнє дослідження висвітлює проблеми об'єднання сенсорів, підкреслюючи необхідність надійних фреймворків, які забезпечують безперешкодну інтеграцію гетерогенних джерел даних для підвищення продуктивності безпілотного автомобіля. У роботі [9] проведено всебічний огляд досягнень у технологіях сприйняття і зондування, що мають вирішальне значення для досягнення безпечних і ефективних операцій в CAV. Їхні висновки акцентують увагу на важливості інноваційних сенсорних системах, здатних протистояти потенційним кіберзагрозам, зберігаючи при цьому високу точність в динамічному середовищі. Авторами в роботі [10] запропоновано складну систему бортових сенсорів, яка використовує поєднання багатоцільових компонентів і компонентів які оперують інформацією від багатьох джерел, створюючи більш стійку і адаптивну систему сприйняття. Ця система покращує ситуаційну обізнаність і зменшує вразливість, пов'язану з ізольованими сенсорними атаками. Аналогічно, в роботі [11] представлено детальний аналіз п'ятишарової архітектури для CAV. В їхньому дослідженні описується ієрархічний підхід, який об'єднує рівні зондування, зв'язку, обчислень, управління і додатків, забезпечуючи надійну основу для пом'якшення потенційних порушень безпеки. Хоча ці дослідження роблять значний внесок у розумінні вразливостей CAV, інші автори приділили увагу критично важливим бездротовим технологіям, які полегшують передачу даних. В роботі [12], окреслено стратегії розподілу ресурсів, характерні для виділеного зв'язку малої дальності (DSRC – dedicated short range communication) і технологій «мобільний транспортний засіб до всього» (C-V2X – cellular vehicle-to-anything). У їхній роботі підкреслюється необхідність безпечного та ефективного управління ресурсами для зменшення ризиків, притаманних автомобільним комунікаційним мережам. Крім того, зловмисні атаки, спрямовані на CAV, були в центрі уваги кількох досліджень. В роботі [13] проаналізували наслідки шкідливих кібера-

так, надаючи уявлення про потенційні стратегії пом'якшення наслідків. В роботі [14] дослідники розглянули конкретні реальні сценарії атак, пропонуючи детальний аналіз методів використання експлойтів та їхніх наслідків для автомобільних систем. Цей аналіз підкреслює актуальність розробки проактивних заходів безпеки для протидії постійно мінливому ландшафту кіберзагроз для CAV.

Постановка завдання. Швидкий розвиток технологій CAV створює нові загрози в галузі кібербезпеки. Відсутність детального аналізу різного типу атак на CAV, який би описував їх особливості та вплив на CAV, ускладнює проведення аналізу та обмежує можливості для розробки ефективних систем протидії зловмисним атакам. Мета даної роботи полягає в проведенні комплексного аналізу сучасних кіберзагроз для CAV з метою: зведення відомостей про кібератаки на CAV в єдину структуру, що дозволить ідентифікувати прогалини в існуючих дослідженнях; аналізу технічних аспектів реалізації атак, включаючи методи проникнення, використання вразливостей та впливу на компоненти CAV; визначення потенційних наслідків різних типів атак для безпеки руху, конфіденційності даних та доступності функціоналу транспортних засобів; формулювання практичних рекомендацій щодо підвищення рівня кібербезпеки.

Виклад основного матеріалу. На відміну від традиційних транспортних засобів, AVs працюють у високо взаємопов'язаній екосистемі, покладаючись на безперебійний зв'язок із зовнішніми мережами, що включають інші транспортні засоби, придорожню інфраструктуру та централізовані хмарні сервіси. Хоча така взаємопов'язаність підвищує ефективність і безпеку, вона одночасно створює середовище для атак, забезпечуючи потенційні точки входу для зловмисників [15]. Така дуальність мережевих систем підкреслює гостру потребу в надійних заходах кібербезпеки.

Суттєвою відмінністю AVs є їхня залежність від обробки величезних обсягів даних для підтримки таких функцій, як навігація, прийняття рішень і розпізнавання об'єктів. Ці потоки даних часто включають зображення і дані з датчиків, які є особливо вразливими до ворожих атак. Алгоритмами глибокого навчання, які широко використовуються для обробки зображень в AVs, можна маніпулювати. І як результат – система неправильно інтерпретує навколишнє середовище. Зі збільшенням обсягу оброблюваних даних зростає ймовірність такого втручання, що збільшує ризик хибних спрацьовувань і збоїв у роботі системи. Ця вразливість посилюється обмеженнями в надійності сучасних моделей машинного навчання і проблемами забезпечення цілісності даних у реальному часі в різних умовах експлуатації. Крім того, початковий етап розвитку технологій відеоспостереження, як в апаратній, так і в програмній сферах значно підвищує їхню вразливість до кіберзагроз. Апаратні компоненти, такі як датчики та модулі зв'язку, можуть містити вразливості, які можна використати, через недоліки конструкції або недостатньо захищене програмне забезпечення. Аналогічно, програмна архітектура антивірусів, що складається з операційних систем, програмного забезпечення та прикладних рівнів, надає численні можливості для втручання. Зловмисники можуть використовувати ці вразливості для порушення роботи, маніпулювання поведінкою автомобіля або викрадення конфіденційних даних користувача. Особливо небезпечним вектором атак є зовнішні інтерфейси зв'язку автомобілів. Зв'язок «транспортний засіб – все» (V2X – vehicle-to-everything), що охоплює взаємодію «транспортний засіб – транспортний засіб» (V2V – vehicle-to-vehicle) та «транспортний засіб – інфраструктура» (V2I – vehicle-to-infrastructure), має головне значення для забезпечення спільного водіння та управління дорожнім рухом. Однак ці канали зв'язку дуже вразливі до підміни, атак типу «людина посередині» та ін'єкції даних. Відсутність стандартизованих протоколів шифрування та автентифікації для V2X-комунікацій ще більше ускладнює проблему, підкреслюючи значну прогалину в існуючих системах безпеки. Крім внутрішніх технологічних слабкостей, AVs стикаються з зовнішніми загрозами, пов’язаними з мінливістю та непередбачуваністю умов дорожнього руху, що ускладнює забезпечення їхньої надійності.

Загрози кібербезпеки для AV можна класифікувати на чотири основні категорії (наведено на рис. 1): атаки на мережеві протоколи, маніпуляції з сенсорними даними, пошкодження апаратних компонентів та прямі фізичні атаки.

Спектр атак на мережі VANET (vehicular ad-hoc network) досить широкий і включає в себе як зовнішні, так і внутрішні загрози. Одним із найпоширеніших методів є атаки на механізми автентифікації, які дозволяють зловмисникам підробляти ідентифікатори транспортних засобів та отримувати несанкціонований доступ до мережі. Важливими компонентами механізмів безпеки в CAV є – паролі та криптографічні ключі, що діють як захист від несанкціонованого доступу. Однак,

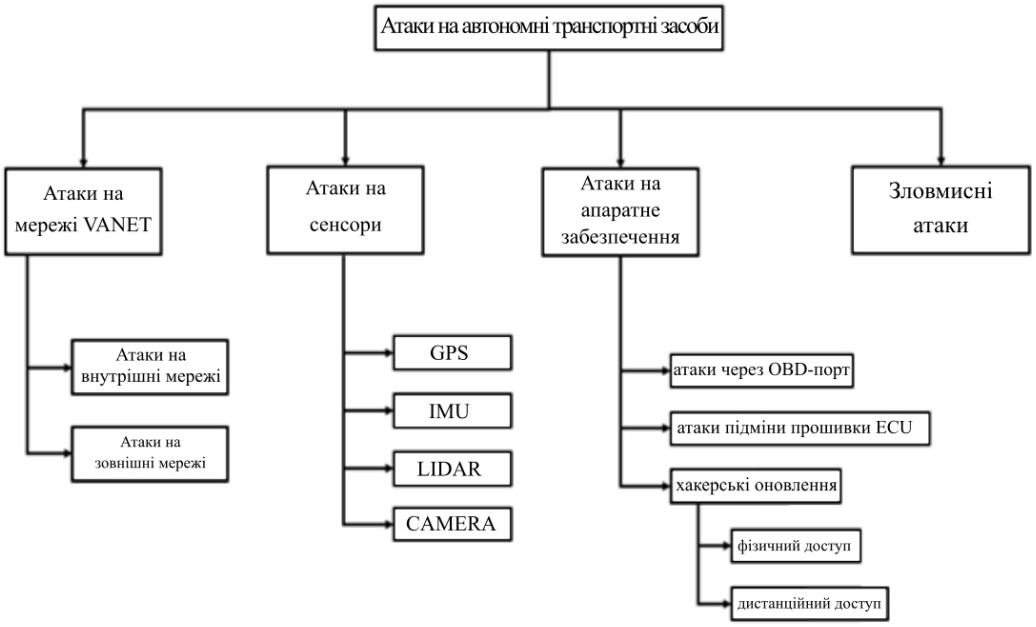


Рис. 1. Потенціальна атаки на мережеві та автономні транспортні засоби

ці механізми не є невразливими до кіберзагроз. Зловмисники часто використовують вразливості в системах, що базуються на ключах і паролях, використовуючи такі методи, як атаки грубої сили, коли робляться багаторазові спроби вгадати або обійти облікові дані для автентифікації [16]. Такі методи є особливо проблематичними для систем, що використовують інфрачервону технологію, оскільки вони можуть бути вразливими до таких атак після серії невдалих спроб, що призводить до несанкціонованого доступу. Атаки грубої сили не тільки ставлять під загрозу безпеку автомобіля, але й створюють значні ризики для конфіденційності користувачів. Після того, як пароль автомобіля зламаний, конфіденційна особиста інформація, така як історія поїздок, вподобання користувача та контактні дані, що зберігаються в системі автомобіля, може стати доступною. Ця проблема стає ще більш гострою через дедалі ширшу інтеграцію технології Bluetooth у транспортні засоби. Порушення з'єднання Bluetooth, навмисне чи випадкове, може слугувати вектором для використання слабких місць у системі безпеки, потенційно надаючи неавторизованим користувачам доступ до персональних даних або контроль над системами транспортного засобу. Ризик, пов'язаний з такого типу атаками, показує необхідність застосування сучасних заходів безпеки. Такі технології, як багатофакторна автентифікація (MFA – multi-factor authentication), біометрична верифікація та динамічна генерація паролів, можуть значно підвищити стійкість цих систем. Більше того, включення систем моніторингу в режимі реального часу і виявлення втручань в спеціальні мережі на базі транспортних засобів (VANET) може забезпечити додатковий рівень захисту, виявляючи і зменшуючи потенційні спроби грубого злому ще до того, як вони стануть успішними.

До зовнішнього типу атак відносяться атаки на мережі V2X, яка інтегрує зв'язок зі смартфонами, хмарними сервісами та іншими пристроями [17]. Функціональність V2X підтримується кількома протоколами зв'язку, такими як Dedicated Short Range Communication (DSRC), IEEE 802.11p та Wireless Access in Vehicle Environments (WAVE). Стандарт DSRC, створений для роботи на частоті 5,9 ГГц з пропускною здатністю 75 МГц, спеціалізується на забезпеченні зв'язку між транспортними засобами. Водночас, протоколи IEEE 802.11p та WAVE, будучи більш універсальними, знайшли своє застосування у V2X-системах, забезпечуючи ширший спектр можливостей для обміну даними між автомобілями та інфраструктурою. Незважаючи на свою спеціалізовану природу, ці протоколи мають спільні вразливості, які роблять їх вразливими до потенційних атак. Наприклад, зловмисники можуть атакувати такі критичні операції, як обгін, зміна смуги руху та обмін даними під час комунікації між транспортними засобами (V2V). Однією з поширених загроз є атака з використанням підробленого ідентифікатора, коли зловмисник використовує підроблений ідентифікатор для

встановлення зв'язку з автомобілем-мішенню. За допомогою цього обману ворожий суб'єкт може передавати та отримувати шкідливі дані, захоплюючи конфіденційну інформацію для зловмисних цілей [16]. Цей тип атак ускладнюється використанням незашифрованих і незахищених протоколів зв'язку, які дозволяють зловмисникам підслуховувати розмови V2V. Такі вразливості можуть призвести до перехоплення конфіденційних даних, таких як ключі автентифікації, які згодом можуть бути використані в подальших атаках. У мережах V2I ризики ще більше зростають. Встановлення з'єднання з базовою станцією створює двосторонній канал зв'язку, що наражає транспортні засоби на потенційні загрози з боку підконтрольних зловмисникам інтелектуальних дорожніх знаків або вузлів стільникових мереж. Зловмисники можуть використовувати ці з'єднання для отримання несанкціонованого доступу до мережі автомобіля, включаючи його електронні блоки керування. Такий доступ не лише загрожує цілісності систем автомобіля, але й ставить під загрозу безпеку та конфіденційність користувачів. Для усунення цих вразливостей слід використовувати стійкі протоколи шифрування, механізми автентифікації в режимі реального часу та вдосконалені системи виявлення вторгнень.

Однією з найсерйозніших загроз для CAV, які підключені до Інтернету є розподілені атаки на відмову в обслуговуванні (DDoS – Distributed Denial of Service). Ці атаки спрямовані на порушення роботи системи шляхом перевантаження мережевих сервісів за допомогою безлічі шкідливих запитів або векторів атаки. Надмірний трафік, що генерується під час DDoS-атаки, призводить до сильного перевантаження мережі, що часто призводить до погіршення або повної відмови критично важливих функцій транспортного засобу. Цей тип збоїв може завдати значної шкоди транспортній інфраструктурі та спричинити значні операційні проблеми. Наслідки таких атак виходять за рамки простих перебоїв в обслуговуванні. Втручання в роботу систем зв'язку та управління CAV створює значний ризик виникнення аварійних ситуацій, що може призвести до катастрофічних наслідків для безпеки як пасажирів, так і оточуючих. Зокрема, DDoS-атаки становлять серйозну загрозу, оскільки можуть призвести до відмови критично важливих систем. Для мінімізації ризиків необхідно розробляти ефективні системи виявлення аномалій та впроваджувати технології адаптивної фільтрації мережевого трафіку.

Серед найпоширеніших загроз для AV можна виділити атаки, спрямовані на втручання в роботу сенсорів:

– система глобального позиціонування (GPS) є основою для ідентифікації та навігації транспортних засобів, використовуючи точні дані геолокації. Поширення супутникових систем позиціонування GPS та відкритий доступ до їхніх даних, хоча й сприяли розвитку навігаційних технологій, проте суттєво підвищили ризик кібератак. Зловмисники можуть спотворювати GPS-сигнали, що призводить до неточностей у визначенні місцезнаходження та, як наслідок, створює загрозу для безпеки як окремих користувачів, так і цілих транспортних систем. Зловмисники можуть використовувати дані з відкритим доступом для маніпулювання навігацією, передаючи спотворені сигнали. Такий метод, відомий як підміна GPS. Це передбачає трансляцію фальшивих сигналів, які є потужнішими за справжні, що призводить до того, що транспортні засоби неправильно інтерпретують своє місцезнаходження і відхиляються від запланованих маршрутів. Аналогічно, глушіння GPS виводить систему з ладу, переповнюючи її шумовими сигналами. Обидва види атак становлять значну загрозу для безпеки пасажирів, порушуючи роботу системи навігації та управління транспортним засобом [18];

– інерційний вимірювальний блок (IMU – inertial measurement unit), що складається з гіроскопа та акселерометра, вимірює швидкість, прискорення та орієнтацію транспортного засобу. IMU також відстежує динаміку навколишнього середовища, наприклад, градієнти. Зловмисники можуть змінити або пошкодити дані датчиків, маніпулюючи показниками нахилу дороги. Наприклад, зловмисник може фальсифікувати дані про нахил, змушуючи транспортний засіб надмірно сповільнюватися на рівній місцевості. Ця маніпуляція не тільки порушує роботу транспортного засобу, але й впливає на навколишній рух, що потенційно може призвести до заторів або аварій;

– системи виявлення світла і визначення дальності (LiDAR) – полегшують локалізацію, виявлення перешкод і уникнення зіткнень, вимірюючи час, необхідний для відбиття світла від об'єктів. Ці системи є високоефективними, але чутливими до перешкод сигналу. Зловмисники можуть скористатися цим, передаючи схожі сигнали, змушуючи автомобіль неправильно ідентифікувати об'єкти або сприймати неіснуючі перешкоди. Такі атаки можуть змусити транспортні засоби надмірно сповільнитися або зупинитися, порушуючи транспортний потік і наражаючи на небезпеку пасажирів;

– моноскопічні та стереоскопічні камери – виконують такі важливі завдання, як визначення смуги руху, розпізнавання дорожніх знаків та

ідентифікація перешкод. Однак вони вразливі до цілеспрямованих атак. Наприклад, інтенсивні джерела світла, такі як фари дальнього світла або фари зустрічного автомобіля, можуть перевантажити датчики камери. Це може призвести до хибних спрацьовувань або збоїв у розпізнаванні об'єктів, що підвищує ризик аварій. Більше того, CMOS датчики, що використовуються в камерах, можуть зазнати пошкоджень від надзвичайно яскравого світла, що робить систему неефективною.

Окрему категорію становлять атаки, спрямовані безпосередньо на апаратне забезпечення транспортних засобів:

− атаки через OBD-порт – більшість транспортних засобів оснащуються портом бортової діагностики (OBD), що дозволяє отримувати діагностичні дані та дані про функціонування. Цей інтерфейс забезпечує зв'язок між електронними блоками керування (ECU) автомобіля через шину CAN. Пристрій OBD підключається до комп'ютера через USB або Bluetooth, що полегшує діагностику. Однак ця функція становить значний ризик для кібербезпеки. Зловмисники можуть використовувати інтерфейс OBD для доступу до електронних блоків керування автомобілем, пошкоджуючи мережу. Ця вразливість підкреслює необхідність надійного контролю доступу та механізмів шифрування для таких інтерфейсів;

− атаки на прошивку електронних блоків керування (ECU, engine control units) – сучасні транспортні засоби покладаються на численні електронні блоки управління, кожен з яких відповідає за управління певними підсистемами. Хоча прошивка ECU є захищеною і розроблена з метою безпеки, зловмисники все частіше застосовують методи перепрошивки ECU шкідливою прошивкою. Ця форма атаки з прямим доступом передбачає, що зловмисник отримує фізичний доступ до ECU, використовуючи зовнішні інтерфейси для модифікації прошивки та зміни поведінки ECU. Превентивні стратегії включають впровадження протоколів автентифікації для оновлення програмного забезпечення, використання методів хешування для перевірки цілісності прошивки та захист пам'яті ECU від несанкціонованих змін або підміни ключів безпеки;

− несанкціоновані оновлення прошивки часто не містять критично важливих виправлень безпеки, що робить транспортні засоби вразливими до кібератак, здатних вилучати конфіденційні дані або встановлювати шкідливе програмне забезпечення. Несанкціоновані оновлення можуть бути впроваджені двома основними способами:

− фізичний доступ – зловмисники можуть перевантажити фізичні рівні або втрутитися в окремі модулі, такі як датчики та комунікаційні інтерфейси, створюючи вразливості;

− віддалені атаки використовують такі мережі, як WiFi, Bluetooth і стільниковий зв'язок (наприклад, 4G). У деяких випадках пряме з'єднання між ECU та CAN-шиною збільшує ризик порушення роботи через шкідливий код, введений через прошивку з доступом до Інтернету.

До числа найпоширеніших загроз безпеки CAV належать зловмисні атаки. Для забезпечення безпеки автономних транспортних засобів важливою є точна ідентифікація об'єктів на дорозі. Глибоке навчання, завдяки своїй здатності до імовірнісної оцінки, дозволяє з високою вірогідністю класифікувати різноманітні об'єкти, такі як пішоходи, транспортні засоби та дорожні знаки. Цей підхід дозволяє AV ефективно інтерпретувати навколишній світ і приймати безпечні рішення, необхідні для автономного руху. Однак нейронні мережі (DNN, Deep Neural Networks) чутливі до ворожих атак – цілеспрямованих кіберзагроз, коли незначні зміни вхідних даних змушують модель приймати помилкові рішення. Такі ворожі атаки використовують вразливі місця в DNN, що потенційно загрожує безпеці та функціональності штучного інтелекту. Наприклад, незначні модифікації фізичних об'єктів, такі як відповідно розміщені наклейки на знаках зупинки, можуть ввести в оману алгоритми розпізнавання дорожніх знаків, змушуючи їх неправильно ідентифікувати критичні символи. Це показує, як ворожі атаки можуть перетворити, здавалося б, нешкідливі зміни на небезпечні помилки в роботі AV-систем.

Висновки. Аналіз сучасного стану безпеки мережевих та автономних транспортних засобів (CAV) свідчить про зростання різноманітності та складності кіберзагроз. Складність систем CAV, що об'єднують механічні, електронні та програмні компоненти, створює сприятливе середовище для атак різного типу. Особливу увагу заслуговують вразливості систем безключового доступу, які можуть бути використані для несанкціонованого доступу до транспортного засобу, а також атаки на зарядну інфраструктуру електромобілів, що відкривають нові шляхи для проникнення зловмисників. Розмаїття виробників обладнання та відсутність єдиних стандартів безпеки ускладнюють процес забезпечення кібербезпеки CAV. Незважаючи на це, нові технології, такі як штучний інтелект та машинне навчання, відкривають нові можливості для розробки ефективних систем захисту. Однак, паралельно з розвитком захисних засобів, з'являються нові вектори атак, що підкреслює необхідність постійного моніторингу та адаптації стратегій кібербезпеки.

Список літератури:

1. Olariu S., Weigle M.C. Vehicular networks: from theory to practice. Chapman and Hall/CRC, New York, 2009, p.472.
2. Kopelias P., Demiridi E., Vogiatzis K., Skabardonis A., Zafiropoulou V. Connected & autonomous vehicles–Environmental impacts–A review. Science of the total environment, 712, 2020, p.135237-135251.
3. Thierer A., Castillo A. Projecting the growth and economic impact of the internet of things, George Mason University, Mercatus Center, 15, 2015, pp.158-169.
4. Pype P., Daalderop G., Schulz-Kamm E., Walters E., Grafenstein M.V. Privacy and security in autonomous vehicles., Automated driving, Cham., 2016, pp. 17-27.
5. David C., Fry S. Automotive security best practices, Intel Security, 2016, p.17.
6. Hoque M.A., Hasan R. Exposing adaptive cruise control in advanced driving assistance systems, 8th WF-IoT, IEEE, 2022, pp. 1-6.
7. Zong W., Zhang C., Wang Z., Zhu J., Chen Q. Architecture design and implementation of an autonomous vehicle, IEEE Access 6, 2018, pp.21956-21970.
8. Wang Z., Wu Y., Niu Q. Multi-sensor fusion in automated driving: a survey, IEEE Access 8, 2019, pp.2847-2868.
9. Llorca D.F., Daza I.G., Parra N.H., Alonso I.P. Sensors and Sensing for Intelligent Vehicles, 2020, pp. 5115-5123.
10. Xiao Z., Yang D., Wen F., Jiang K. A unified multiple-target positioning framework for intelligent connected vehicles, Sensors, 19 (9), 2019, pp.1967-1988.
11. Kaiwartya O., Abdullah A.H., Cao Y., Altameem A., Prasad M., Lin C.- T., Liu X. Internet of vehicles: motivation, layered architecture, network model, challenges, and future aspects, IEEE Access, 4, 2016, pp.5356-5373.
12. Noor-A-Rahim M., Liu Z., Lee H., Ali G.M.N., Pesch D., Xiao P. A survey on resource allocation in vehicular networks, IEEE Trans. Intell. Transport. Syst., 23 (2), 2020, pp.701-721.
13. Kopencova D., Rak R. Issues of vehicle digital forensics, in: XII International Science-Technical Conference Automotive Safety, IEEE, 2020, pp.1-6.
14. Rak R., Kopencová D. Actual issues of modern digital vehicle forensics, Internet Thinks Cloud Comp., 8 (1), 2020, pp.208-234.
15. Saoudi O., Singh I., Mahyar H. Autonomous Vehicles: Open-Source Technologies, Considerations and Development, Advances in Artificial Intelligence and Machine Learning, 3(1), 2022, pp.669-692.
16. Almeaibed S., Al-Rubaye S., Tsourdos A., Avdelidis N.P. Digital twin analysis to promote safety and security in autonomous vehicles, IEEE Communications Standards Magazine, 5(1) , 2021, pp.40-46.
17. Harvey J., Kumar S. A survey of intelligent transportation systems security: challenges and solutions, IEEE 6th Intl Conference on Big Data Security on Cloud (BigDataSecurity), IEEE, 2020, pp. 263-268.
18. Luo Q., Cao Y., Liu J., Benslimane A. Localization and navigation in autonomous driving: Threats and countermeasures, IEEE Wireless Communications, 26(4), 2019, pp.38-45.

Ciapa S.M. CYBERSECURITY THREATS AND VULNERABILITIES IN CONNECTED AND AUTONOMOUS TRANSPORTATION SYSTEMS

The article is devoted to the study of cybersecurity threats associated with networked and autonomous vehicles (CAVs), a key area of development in the automotive industry. CAVs have the potential to improve the transport industry by providing enhanced road safety, improved accessibility and efficiency of transportation. Despite the significant progress in the development of CAV systems, the issue of their cybersecurity remains relevant. The growing number of networked devices and the increasing complexity of CAV control systems create new opportunities for cyberattacks that can lead to serious consequences. This article reveals the critical role of sensors and network communications in improving automotive infrastructure, reducing congestion and accidents, and creating a unified transport system. Despite the obvious advantages of these technologies, the article identifies that cybersecurity threats pose significant risks to the safety and efficiency of CAVs. It is found that the growing integration of automated and networked systems expands the opportunities for criminal actors to exploit vulnerabilities, jeopardising the security of CAVs. To address this problem, the study classifies cybersecurity threats into four distinct groups: attacks on the vehicle's VANET network; attacks targeting the sensor infrastructure; attacks targeting the hardware; and malicious attacks. These classifications correspond to the different communication networks and systems targeted by attackers. The article also reveals the potential for escalation of cyber attacks as an additional threat inherent in the interconnected CAV environment. It also discusses current countermeasures designed to protect these vehicles. By highlighting the key points, the article delves into adversary attacks on autonomous vehicles, highlighting their consequences and emphasising the urgent need for more comprehensive defence mechanisms. It is emphasised that further research into enhancing the cybersecurity of vehicles and related infrastructure will contribute to improving security in general, increasing the versatility of CAVs and ensuring compliance with the new requirements of modern transport systems..

Key words: *connected and autonomous vehicles, automotive network, cyberattacks, vehicle protection, cyber-physical systems.*

ТРАНСПОРТ

УДК 656.13
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/35

Бойків М.В.
Національний університет «Львівська політехніка»

Жеребецький Н.В.
Національний університет «Львівська політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ РУХУ НА ПЕРЕХРЕСТІ З ІНТЕНСИВНИМ ТРАНСПОРТНИМ ПОТОКОМ НА ГОЛОВНОМУ НАПРЯМКУ

У роботі досліджено параметри транспортного потоку на основі натурних досліджень на перехресті вулиць з кільцевою дорогою м. Львів. Через перехрестя проходить дорога міжнародного значення М06, тому на головному напрямку спостерігається значна інтенсивність руху транспортного потоку, зокрема велика частина вантажного транзитного транспорту. Перехрестя характеризується великого площею перехрестя та ухилом проїзної частини на одному із підходів.

За результатами натурних досліджень швидкісного режиму транспортних потоків у зоні перехрестя, коли рух транспортних засобів відбувався сходу, на основі відеозйомки побудовано загальний розподіл швидкості руху на головному напрямку кільцевої дороги м. Львова із зазначенням графічного розподілу протягом дозволяючого сигналу у фазі регулювання. Розподіл швидкості руху має різкі коливання пов'язані із здійсненням поворотних маневрів транспортними засобами, які конфліктують із зустрічним потоками головного напрямку. Встановлено, що на безпечний режим руху на перехресті впливає розподіл інтенсивності транспортних потоків за напрямками руху на перехресті, дозволені лівоповоротні маневри, які конфліктують з інтенсивним зустріним потоком головної дороги та перевищення дозволеного швидкісного режиму.

Коливання швидкості руху транспортних засобів на перехресті головного напрямку у першій фазі регулювання дозволяють стверджувати, що при роз'їзді ТЗ на зелений сигнал світлофора, ті автомобілі які проїжджають стоп-лінію сходу, значно перевищують дозволену швидкість руху в населеному пункті. Через появу у транспортному потоці поворотних ТЗ відбувається ущільнення всього ТП на підході до перехрестя, динамічний габарит починає стрімко зменшуватися до розмірів близьких гальмівному шляху, небезпека руху зростає. Швидкість є головною проблемою, яка впливає на безпечні умови руху на перехресті кільцевої дороги (дорога міжнародного значення М06) з примикаючими вулицями у населеному пункті Ямпіль. Це частково пов'язано з тим, що покращені динамічні характеристики автомобілів та задовільне дорожнє покриття сприяють навіть вищим швидкостям руху в зоні перехрестя, ніж дозволяється ПДР у населеному пункті.

Ключові слова: *кільцева дорога, транспортний потік, регульоване перехрестя, швидкість руху, пофазний роз'їзд, зона перехрестя, поворотні маневри, смуга руху.*

Постановка проблеми. Стрімкий ріст рівня автомобілізації з кожним роком охоплює значну кількість країн. На сьогодні, у зв'язку із війною в Україні ми спостерігаємо міграцію населення між різними містами та тенденцію переміщення промислових потужностей, виробничої і складської інфраструктури у більш безпечні приміські та міські зони [1, с. 68]. Як наслідок, це приводить до зростання кількості автомобілів і обсягів перевезень та сприяє виникненню транспортних проблем на вулично-дорожній мережі (ВДМ) міст. Особливо це спостерігається на складних перехрестях ВДМ, магістральних вулицях, кільцевих дорогах міст та автомобільних шляхах міжнародного значення на території України. У таких місцях взаємодії всіх учасників дорожнього руху утворюються черги та затори транспортних потоків, а це викликає зниження швидкості сполучення, безпеки та погіршення умов руху.

Ріст інтенсивності руху у м. Львові, як і в інших містах, спричиняє завантаження ВДМ та автомобільних шляхів міжнародного значення, які про-

ходять територією міста, як наслідок утворюється значні черги на підходах до складних перехресть. Тому розробка заходів з підвищення ефективності роботи перехресть та безпечних умов руху є ключовим завданням щодо вирішення транспортних проблем. Забезпечення швидкого і безпечного режиму руху у місті та перехрестях з інтенсивними і неоднорідними транспортними потоками вимагає комплексу заходів планувального та організаційного характеру.

Загалом умови дорожнього руху є результатом багатьох, різноманітних і складних взаємодій між елементами системи дорожнього руху: водіями, транспортними засобами, ВДМ та засобами керування. Однак інженери дорожнього руху приділяють мало уваги впливу своїх проектів на учасників дорожнього руху та характеристики транспортних засобів. Навпаки, їх проекти зосереджені на створенні оптимальної системи вулиць і доріг та засобів керування з інженерної точки зору.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На перехресті, за обмеженого простору у містах, безпечного його функціонування можна досягти шляхом правильного управління транспортним потоками, однак це подекуди призводить до ускладнення руху, зниженням швидкості руху та навіть збільшує ймовірність конфлікту між транспортними засобами, а інколи призводить до дорожньо-транспортних подій (ДТП) [2, с. 358]. Вулиці і дороги мають забезпечувати безпечний та зручний рух транспортних потоків на ВДМ. Складним місцем ВДМ з точки зору пропускної здатності є автомобільні дороги державного і міжнародного значення через те, що вони проектуються різних розмірів і конфігурацій (кількості смуг руху, ширини смуг, поздовжнього похилу дороги, ширини проїзної частини).

На транспортний потік на регульованих перехрестях впливає багато чинників, серед яких є тип покриття, закономірності розподілу черг транспортних засобів у зоні перехрестя, особливості світлофорного режиму та пофазного роз'їзду, швидкість проїзду через перехрестя [3, с. 255].

ДТП на завантажених перехрестях, коли рух регулюється сигналами світлофора трапляються досить часто, незважаючи на те, що перевага чітко регулюється правилами дорожнього руху (ПДР) та однозначно визначена дорожніми знаками. Проте проблема руху ще більше ускладняється, коли один із учасників рухається з недозволеною швидкістю [4, с. 562]. Сучасні дослідження безпеки дорожнього руху у містах [5, с. 113; 6, с. 30] з урахуванням загальних науково-практичних тенденцій щодо підвищення безпеки дорожнього руху вказують на суттєву необхідність вдосконалення засобів регулювання дорожнім рухом, особливо світлофорного регулюванням [7, с. 11]. Сучасні заходи вдосконалення світлофорного регулювання спрямовані на створення інтелектуального світлофорного регулювання та прив'язку алгоритмів керування руху до параметрів транспортного потоку. Вказані напрямки є безсумнівно актуальними з погляду розробки заходів з вдосконалення світлофорного регулювання, але вони не передбачають явища щодо істотних змін транспортних потоків на підходах та врахування дозволених маневрів зі смуг руху на перехрестях. Світлофорне регулювання має також негативні наслідки роботи в межах збільшення аварійності на підходах до перехрестя на фоні збільшення вантажного і транзитного транспорту на магістральних і міжнародних дорогах, які необхідно враховувати у загальних заходах підвищення безпеки руху на ВДМ міст [8, с. 91]. Згідно проведених досліджень [9, с. 119], авторами запропоновано для синтезу критерію оцінки безпеки руху на міських перехрестях доріг в одному рівні зі світлофорним регулюванням враховувати виникнення додаткових ущільнень транспортних потоків відносно тих, що утворюються за нерегульованого руху на перехресті.

Проведені раніше дослідження щодо прогнозування заторів здебільшого об'єднували дані на рівні окремих сегментів доріг або транспортного потоку за окремий регламентований інтервал часу [10, с. 153]. Проте потрібне точне прогнозування виникнення заторових ситуацій на окремих смугах, що дозволить детально зрозуміти просторово-часові залежності, яке призведе до зменшення черг і підвищення ефективності їх роботи.

На магістральних і міжнародних дорогах рух вантажних автомобілів є важливою складовою транспорту для сучасної транспортної системи міста. У роботі [10, с. 156] було досягнуто значного прогресу, щоб зробити його максимально безпечним і ефективним, де розглядалась безпека руху вантажного транспорту на перехрестях, а особлива увага приділяється безпеці найбільш вразливих учасників дорожнього руху, таких як пішоходи та велосипедисти.

Проїзд на червоний сигнал світлофора є однією з основною причиною складних аварій на регульованих перехрестях [8, с. 93], тому в роботі дослідниками відзначається, що важливо, щоб зміна перехідного інтервалу була належним чином визначена із урахуванням умов руху на

перехресті. Занадто короткий інтервал може призвести до того, що водії не зможуть безпечно зупинитися, і спричинити непередбачений проїзд на червоний сигнал. Занадто довгий перехідний інтервал між фазами регулювання може призвести до того, що водії розглядатимуть жовтий як продовження зеленої фази та будуть сподіватись закінчити манер і проїхати на червоне світло [9, с. 122]. Тому під час розрахунку тривалості світлофорного циклу слід враховувати такі чинники, як швидкість наближення ТЗ до перехрестя та повороту транспортних засобів, час сприйняття і реакції водія, сповільнення транспортного засобу та планувальні характеристики перехрестя.

Збільшення інтенсивності транспортного потоку, особливо на складних перехрестях призводить до затримок в русі та накопичення черг автомобілів на підходах до перехресть, що понижує безпеку руху всіх учасників руху. Для оптимізації роботи перехресть, авторами у роботі [11, с. 201] описується система автоматичного регулювання світлофорів, яка використовує камеру та обробку зображень для інтелектуального управління рухом на дорозі. У статті розглядаються основні особливості такої системи, де детально описують алгоритми, які використовуються в системі та підтверджують ефективність таких інноваційних підходів управління рухом на дорозі. Результати інноваційних підходів підвищить пропускну здатність доріг та покращать умови руху на перехресті.

Постановка завдання. Метою цього дослідження є оцінка умов руху на регульованому перехресті вулиць з дорогою міжнародного значення М06, яке знаходиться на кільцевій дорозі м. Львова при нестандартній тривалості світлофорного циклу із жорсткими управлінням в умовах інтенсивних транспортних потоків на головному напрямку з урахуванням значної частки вантажного транспорту.

Для досягнення мети дослідження необхідно розв'язати такі завдання: дослідити планувальні особливості та схему дорожнього руху на перехресті; визначити інтенсивність та склад руху за напрямками на перехресті; проаналізувати параметри світлофорного регулювання та пофазного роз'їзду транспортних потоків на перехресті; виявити закономірності зміни швидкісного режиму в зоні перехрестя залежно від показників транспортного потоку; розробити рекомендації щодо підвищення ефективності роботи регульованих перехресть, де спостерігається значна інтенсивність та неоднорідність транспортного потоку.

Виклад основного матеріалу. Режим руху транспортних потоків на міських вулицях і дорогах відрізняються від позаміських умов руху та кільцевих і доріг міжнародного сполучення. Для дослідження було обрано перехрестя на ділянці об'їзної автомобільної дороги міста Львів яке знаходить у межах с. Ямпіль, а саме Кільцева дога – вул. Шевченка – вул. Лукашевичів. По цій ділянці дороги проходить автомобільний шлях міжнародного значення М06 «Київ-Чоп». На перехресті проведено аналіз планувальних особливостей перехрестя та інтенсивності транспортних потоків, який графічно наведено на рисунку 1. Перехрестя має чотири підходи і Х-подібну форму. Головний напрямок руху на перехресті проходить за рухом транспортних потоків по кільцевій дорозі. Перехрестя є регульованим. На перехресті існує п'ять смуг руху (рис. 1.а). На другорядних вулицях на перехресті існує по одній смузі руху, з яких дозволені всі напрямки руху.

На головному напрямку з підходу № 2 існує одна смуга руху з якої також можна виконувати поротні маневри. З підходу № 1, якщо рухатись зі сторони м. Винник існує дві смуги руху, крайня права смуга (II) призначена для руху правоповоротних транспортних засобів. Перехрестя характеризується великою площею перехрестя та значною часткою транзитного вантажного транспорту.

Натурні дослідження інтенсивності транспортного потоку проведено у міжпіковий період руху робочого дня тижня для кожного напрямку на перехресті Кільцева дорога-вул. Шевченка-Лукашевичів (рис. 1.б). Відповідно епюри транспортних потоків на перехресті вулиць можна зазначити, що найбільша інтенсивність спостерігається на головному напрямку – кільцевій дорозі. З підходу № 2 у прямому напрямку (рух у сторону м. Винник) фактична інтенсивність руху є найвища і складає 1003 авт./год. У зворотному напрямку на кільцевій дорозі (рух у сторону с. Гамаліївка) з підходу №1 фактична інтенсивність є дещо меншою і складає 795 авт./год. На примикаючих вулицях другорядного напрямку перехрестя інтенсивність є значно меншою і з вул. Лукашевичів (підхід №4) становить 350 авт.год., а з вул. Шевченка (підхід №3) – 407 авт./год.

Також за результатами досліджень встановлено склад транспортного потоку на перехресті, графічно такий розподіл представлено на рис. 2.

На перехресті вулиць з кільцевої дорогою встановлено значну частку вантажного транспорту. Більшість вантажного транспорту зосереджено на

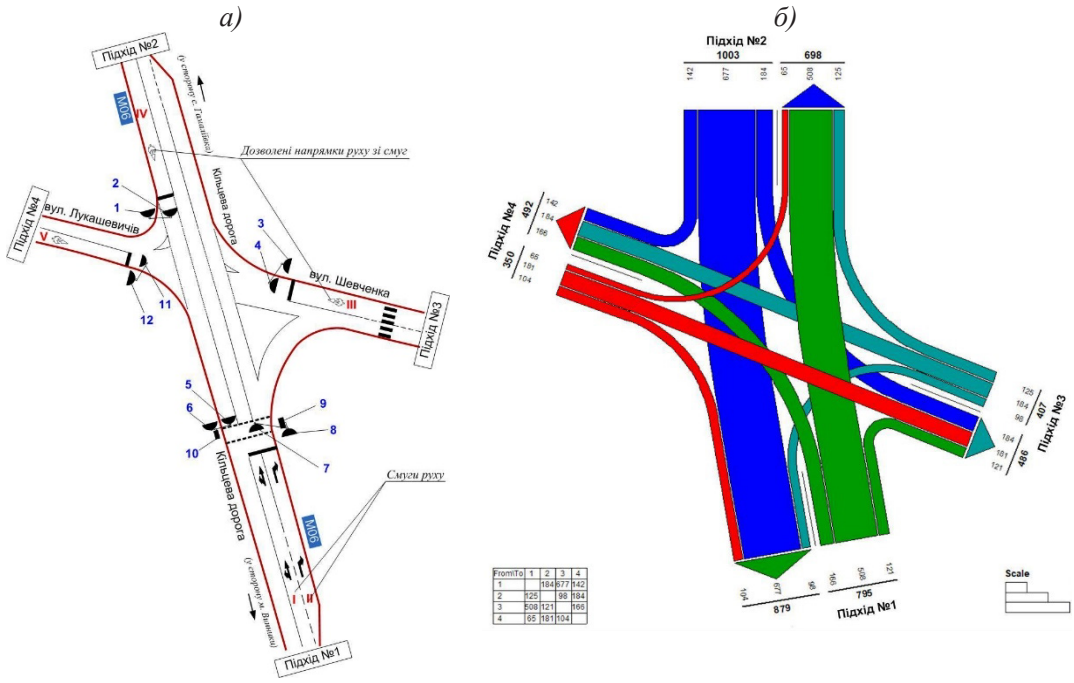


Рис. 1. Планувальні особливості перехрестя вулиці (а) та епюра інтенсивності транспортних потоків (б)

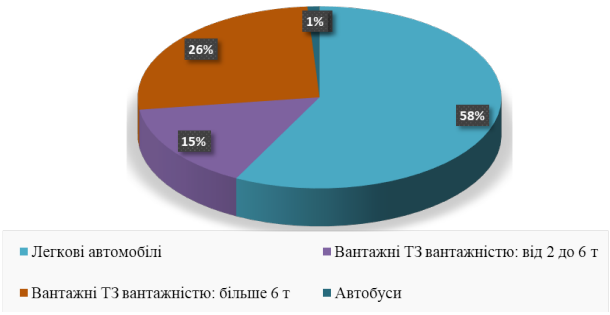


Рис. 2. Існуючий склад транспортного потоку на перехресті вулиць

прямоїдучих напрямках кільцевої дороги, оскільки рух вантажного транспорту у населеному пункті заборонено. На перехресті переважають легкові автомобілі, частка їх складає 58%. Частка вантажних ТЗ вантажністю від 2 до 6 т становить 15%, вантажних ТЗ понад 6 т – 26%. Найменше у транспортному потоці на перехресті зафіксовано автобусів, це пояснюється тим, що перехрестя знаходиться за межам м. Львів у приміській зоні, а через перехрестя здійснюють рух автобуси у міжміському і міжнародному сполученні.

Оскільки перехрестя є регульованим, то на перехресті встановлено основні параметри світлофорного регулювання. Пофазний роз'їзд транспортних потоків на перехресті здійснюється у двох фазах регулювання (рис. 3).

У першій фазі рух на перехресті здійснюють транспортні потоки головного напрямку на кільцевій дорозі (транспортні потоки 1–6). У фазі окрім інтенсивних прямоїдучих потоків зі смуг руху I і IV дозволено здійснювати поворотні маневри, частка яких є незначною. З підходу №1 на кільцевій дорозі є окремо виділена смуга для руху правоповоротного потоку на вул. Шевченка. На перехресті існує один регульований пішохідний перехід через кільцеву дорогу. Оскільки існує велика площа перехрестя, то рух у другій фазі відбувається у два такти. У другій фазі (такт 1) дозволено рух транспортним потокам з другорядних вул. Шевченка і вул. Лукашевичів та перехід пішохідним потокам через кільцеву дорогу. У такті 2 рух пішоходів забороняється, оскільки продовжено подальший рух поворотним потокам (7 і 12) по кільцевій дорозі.

Тривалість циклу на перехресті вулиць є досить великою і складає 151 с. Тривалість першої фази, коли дозволено рух інтенсивним транспортним потоках кільцевою дорогою на перехресті складає 116 с. Друга фаза, яка призначена для пропуску другорядних напрямків на перехресті, становить – 27 с. Проте варто зазначити, що друга фаза складається з двох тактів.

Часові параметри роботи світлофорної сигналізації на перехресті вулиць наводимо у вигляді циклограми на рис. 4.

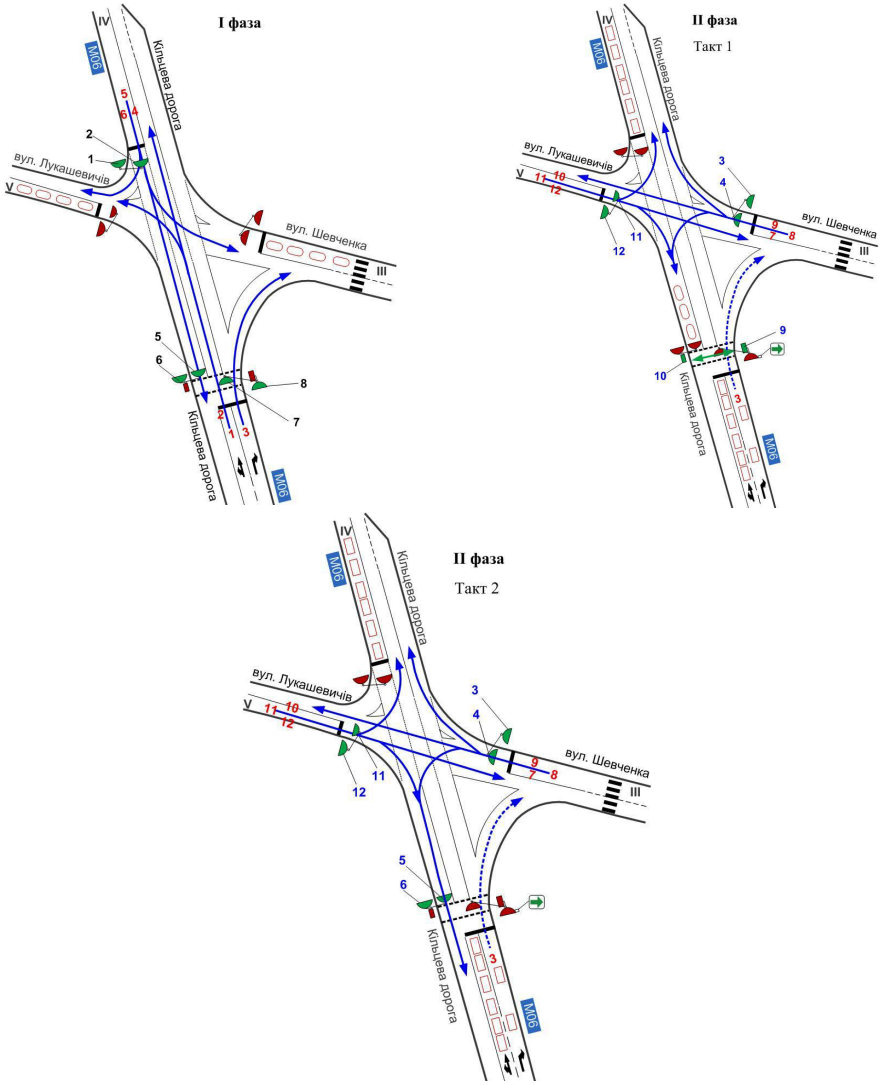


Рис. 3. Існуючий пофазний роз'їзд транспортних потоків на перехресті

Номер світлофора	Графік увімкнення сигналів (Тц = 151с)	Тривалості сигналів		
	25 50 75 100 125 150	$t_з$	$t_ж$	$t_ч$
1,2,7,8		116	4	31
3,4, 11,12		27	4	120
9,10		16	-	135
5,6		127	8	16

Рис. 4. Циклограма роботи світлофорної сигналізації на перехресті

Перший такт дозволяє рух транспортним потоками з вул. Шевченка і вул. Лукашевичів. Для цього цим потокам для виїзду на перехрестя сигналізують основний і дублюючий світлофорний об'єкт 7–9 і відповідно 10–12. Також у цій фазі переходять проїзну частину кільцевої дороги пішоходи, для цього їм у фазі виділено 16 с. У другому такті забороняється рух пішоходам і шляхом увімкнення дозволяючого сигналу на головній дорозі світлофорами 5–6, дозволено продовжити рух і покинути зону перехрестя транспортним засобам, які виїхали на перехрестя з другорядного напрямку. Такий часовий розрив пов'язаний із значною площею перехрестя та потребою про-

пуску пішохідних потоків через кільцеву дорогу з інтенсивним рухом транспорту. Тривалість перехідного інтервалу на перехресті складає 4 с.

Проблема, яка зафіксована на регульованому перехресті, полягає у високій інтенсивності руху на головному напрямку кільцевої дороги, де також існує значна частка транзитного вантажного транспорту, оскільки це автомобільна дорога міжнародного значення. На перехресті існує тільки одна смуга в кожному напрямку руху з якої дозволено лівоповоротний маневр, який значно підвищує небезпеку в русі в зоні перехрестя. Оскільки на перехресті вулиць існує значний ухил проїзної частини, якщо рухатись у сторону м. Винник, де навіть поодинокі поворотні транспортні засоби створюють черги на підході до перехрестя у зв'язку із високою інтенсивність зустрічного транспортного потоку.

Поява поворотних транспортних засобів, які бажали здійснити поворотний маневр з головної дороги призводила до різкої зміни всього транспортного потоку в зоні перехрестя. ТП на головному напрямку розвивають доволі значні швидкості руху, тому раптова поява у потоці поворотного ТЗ, протягом фази регулювання викликала небезпеку в русі. Така ситуація пояснюється тим, що для безпечно пропуску лівоповоротних транспортних засобів на перехресті має практично зупинитись і зустрічний потік, оскільки рух ТП здійснюється в одній фазі.

Для визначення зміни швидкості руху на головному напрямку перехрестя кільцевої дороги проведено дослідження на основі покадрового аналізу відеозапису роботи перехрестя протягом однієї години. Під час дозволяючого сигналу у першій фазі, яка становить 116 с фіксували окремі транспортні засоби на стоп-лінії та визначали їх швидкість руху. Графічні результати дослідження наведено на рис. 5.

У прямому напрямку руху на головній дорозі перехрестя рух транспортного потоку здійснюється у сторону м. Винник, а у зворотному – рух транспортного потоку відбувається у сторону с. Гамаліївка. Як видно з графіку, з початком увімкнення дозволяючого сигналу у фазі регулювання швидкість транспортних засобів починає зростати. Зважаючи на значну тривалість фази на головному напрямку у понад 100 с, швидкість руху є доволі високою і становить у середньому 60 км/год для обох напрямків. У прямому напрямку руху швидкість є дещо вищою, це пояснюється тим що з цього підходу існує значний ухил проїзної частини до зони перехрестя і складає 65–78 км/год, що перевищує допустимий правилами дорожнього руху швидкісний режим у населеному пункті. Якщо брати до уваги рух у зворотному напрямку, то тут спостерігається дещо нижча швидкість в зоні перехрестя, яка становить у середньому 55–65 км/год. Різкі стрибки швидкості на рис. 5 посеред фази регулювання характеризуються поя-

Рис. 5. Результати зміни швидкості руху на стоп-лініях головного напрямку перехрестя при появі у потоці поворотних транспортних засобів

вою у транспортному потоці легкових автомобілів, які точно проїдуть на зелений сигнал, дозволяють собі прискорення і перевищення допустимої швидкості руху, щоб швидше проїхати і покинути зону перехрестя. Аналіз спостережень і фіксації швидкісного режиму транспортних засобів вказує на те, що частина водіїв дозволяють перевищення швидкісного режиму в зоні перехрестя, коли впевнились що проїдуть перехрестя сходу за допомогою світлофорного об'єкту із таймером зворотного відліку. Схожа ситуація характерна для прямого і зворотного напрямків руху у періоду закінчення тривалості зеленого сигналу, де водії намагаються встигнути перетнути стоп-лінію і проїхати перехрестя, на основі табло зворотного відліку, яке показує, скільки часу ще горітиме сигнал у фазі регулювання.

На підходах до перехрестя кільцевої дороги, де з однієї смуги дозволений рух і поворотних ТЗ, під час появи автомобіля, який хоче здійснити лівопоротний маневр відбується значне коливання швидкісного режиму. Як видно з рис. 5, поява навіть одного транспортного засобу викликає різку зміну швидкості руху всього транспортного потоку. Тут є дві характерні зони на графіку, за інтенсивного зустрічного руху, транспортний засіб практично зупинився для появи достатнього часового інтервалу на головному напрямку, щоб виконати лівоповоротній маневр, тут швидкість наближається до нуля. У другому випадку, за умови значного розриву у зустрічному транспортному потоці, автомобілю для здійснення поротного маневру довелось тільки сповільнитись та знизити швидкість, щоб покинути зону перехрестя. Зазвичай така ситуація спостерігається коли на поворотний маневр очікує легковий автомобіль, а водій зустрічного транспортного засобу сигналізує що пропускає автомобіль.

Згідно аналізу швидкостей руху на підходах до перехрестя, режим руху на ділянці головної дороги з інтенсивним рухом має коливальний характер. На безпеку в зоні перехрестя також впливають навіть поодинокі поворотні транспортні засоби на напрямках з інтенсивним рухом транспортного потоку, особливо коли у потоці існує значна вантажного транспорту. Це пов'язано з тим, що рух на магістральних, об'їзних та міжнародних дорогах характеризується значною швидкістю та неоднорідністю транспортного потоку.

За результатами дослідження встановлено, що схема організації руху на регульованому перехресті вулиць за існуючого жорсткого світлофорного регулювання не в повній мірі враховує значну інтенсивність руху та структуру транспортного потоку, що в свою чергу впливає на пропускну здатність перехрестя та безпеку його проїзду.

Висновки. За результатами натурних досліджень встановлено, що інтенсивності транспортних потоків, яка прибуває до перехрестя, супроводжується значною неоднорідності потоків та коливанням рівня завантаження окремих смуг руху. Однак транспортні потоки не є стаціонарними, і в них можуть виникати значні розриви у транспортному потоці або різка зміна швидкісного режиму у зоні перехрестя, що негативно впливає на безпеку руху.

Управління транспортним потоком на перехрестях, а також їх функціонування безпосередньо залежить від площі перехрестя, дозволених напрямків руху на ньому, наявності у транспортному потоці різних за складом транспортних засобів. Для підвищення безпеки руху на регульованих перехрестях вулиць з інтенсивним швидкісним рухом необхідно застосовувати засоби відеонагляду та встановлення камер контролю швидкості на підходах до них з метою зниження швидкості руху транспортних засобів. Для вдосконалення організації дорожнього руху на підходах та в зоні перехресть на міжнародних автошляхах необхідна наявність мінімум двох смуг руху в одному напрямку з метою відведення поворотних маневрів з головних напрямків руху.

Список літератури:

1. Сотнікова А. О. Аналіз транспортної поведінки населення України під час початкової фази повномасштабного вторгнення. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2023. № 6. С. 65–70. https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-171-6-65-70

2. Форнальчик Є. Ю. Вплив швидкості проїзду регульованого перехрестя на інтенсивність потоку насичення / Є. Ю. Форнальчик, І. А. Могила, В. В. Гілевич // *Комунальне господарство міст*. – 2012. – № 103. – С. 355–366.

3. Murat, Yetis Sazi, Sabit Kutluhan, and Ziya Cakici. Investigation of cyclic vehicle queue and delay relationship for isolated signalized intersections. *Procedia-Social and Behavioral Sciences,* 111 (2014): 252-261. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.058

4. Parmar D., Gore N., Rathva D., Dave S., Jain M. Modelling Queuing of Vehicles at Signalized Intersection. In: Mathew T., Joshi G., Velaga N., Arkatkar S. (eds) *Transportation Research . Lecture Notes in Civil Engineering*, 2020, vol 45. Springer, Singapore., pp. 557-565. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9042-6_44

5. Поліщук В. П. Теорія транспортного потоку: методи та моделі організації дорожнього руху: навч. посіб. / В. Поліщук, О. П. Дзюба. – К. : Знання України, 2008. – 175 с.

6. Găluşcă, Narciza-Izabela, et al. Crossing speeds of cars through signalized intersections. *Journal of Engineering Sciences* 3 (2023): 26-34. https://doi.org/10.52326/jes.utm.2023.30(3).03

7. Wang J., Duan X., Wang P., Qiu A.G., & Chen Z. Predicting urban signal-controlled intersection congestion events using spatio-temporal neural point process. *International Journal of Digital Earth*, 17(1). 2024, pp. 1-24. https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2376270

8. Ahrholdt Malte, Grant Grubb, and Erik Agardt. Intersection Safety for Heavy Goods Vehicles. *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2009: Smart Systems for Safety, Sustainability and Comfort*, (2009), 87-96. https://doi.org/10.1007/978-3-642-16362-3_23

9. Hamidi Hodjat and Ali Kamankesh. An approach to intelligent traffic management system using a multi-agent system. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research,* 16, 112-124 (2018). https://doi.org/10.1007/s13177-017-0142-6

10. Royko Yuriy, Oleg Hrytsun and Romana Bura. Choose of optimal regimes of traffic light control in operating zone of pedestrian crossing. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science* 4.1 (2018): 144-159. https://doi.org/10.23939/ujmems2018.01.144

11. Кривенчук Ю.П., Бойків М.В., Бойків Р.В. Інформаційна система автоматичного регулювання алгоритму роботи світлофора // *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. – 2023. – № 6 (329). – С. 199–203. https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2023-329-6

Boikiv M.V., Zherebetskyi N.V. STUDY OF TRAFFIC CONDITIONS AT INTERSECTION WITH A HEAVY TRAFFIC FLOW IN THE MAIN DIRECTION

The paper investigates the main parameters of traffic flow based on field studies at the intersection of streets with a ring road in Lviv. The international road M06 passes through the intersection, so there is a significant traffic volume in the main direction, including a large part of freight transit traffic. The intersection is characterized by a large area and a roadway slope on one of the approaches.

According to the results of field studies of the speed mode of traffic flows in the intersection area, when the traffic was moving from the east, the general distribution of traffic speed in the main direction of the ring road of Lviv was built based on video recording, indicating the graphical distribution during the permissive signal. The distribution of traffic speed has sharp fluctuations due to turning maneuvers by vehicles that conflict with oncoming traffic in the main direction. It is established that the safe mode of traffic at the intersection is influenced by the distribution of traffic volume by traffic directions at the intersection, the allowed left-turn maneuvers that conflict with the intense oncoming flow of the main road, and the excess of the permitted speed limit.

Fluctuations in the speed of vehicles at the intersection in the main direction in the first phase of control allow us to assert that when vehicles pass the green traffic signal, those cars that pass the stop-line from the start significantly exceed the permitted speed in the settlement. Due to the appearance of turning vehicles in the traffic flow, the entire vehicle is densified on the approach to the intersection, the dynamic distance begins to rapidly decrease to the size close to braking distance, and the traffic hazard increases. Speed is the main problem that affects safe traffic conditions at the intersection of the ring road (international road M06) with adjacent streets in the village of Yampil. This is partly because the improved dynamic characteristics of vehicles and satisfactory road surface contribute to even higher speeds in the intersection area than allowed by the traffic rules in the settlement.

Key words: *ring road, traffic flow, signalized intersection, speed of movement, phase sequence, zone of intersection, turn maneuvers, traffic lane.*

УДК 621.341
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/36

Бойко С.М.
Національний університет «Запорізька політехніка»

Котов О.Б.
Національний університет «Запорізька політехніка»

Жуков О.А.
Вінницький національний технічний університет

Реута А.В.
Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ

Журід В.І.
Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ

Дерябіна І.О.
Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ

ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ В СИСТЕМИ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОБ'ЄКТІВ АЕРОДРОМНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Стаття присвячена питанням розробки рекомендацій щодо впровадження інтелектуальних технологій в системи енергозабезпечення об'єктів аеродромної інфраструктури, що є важливис елементом інфраструктури галузі авіаційного транспорту, з метою забезпечення заходів безпеки експлуатації повітряних суден, що в свою чергу дасть можливість підвищення надійності доставки вантажів та перевезення пасажирів. У статті визначено основні вимоги, що пред'являються до систем електропостачання об'єктів аеродромної інфраструктури. Акцентовано увагу на те, що управлінські стратегії мають враховувати впровадження індустрії 4.0, автоматизації, роботизації та використання штучного інтелекту. У статті, зважаючи на глобальні виклики кліматичних змін, привертається увага до впровадженняпринципів зеленої економіки, серед яких, енергоефективність, декарбонізація, розвиток відновлюваних джерел енергії та інші. Також, у статті наголошується на таму, що на сучасному етапі розвитку електроніки та енергетики питання забезпечення ефективного та оперативного керування пристроями у складі складних електротехнічних комплексів, в тому числі з елементами розподіленої генерації (залученням альтернативних та відновлювальних джерел) набуває все більшої актуальності. Тож, під час експлуатації впровадження інтелектуальних систем до структур енергопостачання об'єктів аеродромної інфраструктури є доцільним застосування сучасних електронних та силових напівпровідникових пристроїв, що дасть можливість покращити керованість системою енергозабезпечення та надасть їй гнучкості та адаптивності. Запропоновано використання модифікованого протоколу з введенням децентралізованого обміну між пристроями на базі протоколу X10 в інформаційній інфраструктурі MicroGrid з реалізацією передавання даних за технологією PLC. У запропонованому способі кожен новий пристрій автоматично реєструється у мережі і взаємодіє з наявними пристроями. Визначено, що використання децентралізованої стратегії підвищує його гнучкість та можливості узгодженої взаємодії між пристроями системи MicroGrid для реалізації оперативного енергоефективного керування. Такий підхід дасть можливість інтегрувати процеси інтелектуалізації до систем енергозабезпечення об'єктів аеродромної інфраструктури.

Ключові слова: *авіаційний транспорт, відновлювальні джерела енергії, авіаційна безпека, аеродроми, аеропорти, енергетична інфраструктура.*

Постановка проблеми. Системи енергозабезпечення аеродромів відіграють критичну роль у забезпеченні безпеки, надійності та безперервності роботи аеропортів. Вдосконалення цих систем має враховувати не лише технічні, але й екологічні, економічні та безпекові аспекти [1].

Розподілені енергетичні системи дозволяють підвищити автономність та стійкість енергозабезпечення. Впровадження MicroGrid в аеропортовій інфраструктурі має забезпечити:

– надійність енергопостачання – у разі аварії в мережі MicroGrid забезпечує автономну роботу ключових об'єктів;

– гнучкість – можливість підключення відновлювальних джерел енергії (сонячні панелі, вітрогенератори);

– оптимізацію витрат – ефективне використання власних джерел енергії, зменшення залежності від зовнішніх постачальників.

У той же час, використання відновлюваних джерел енергії має дозволити зменшити вуглецевий слід і підвищити енергоефективність.

З поміж іншого слід зазначити, що впровадження систем управління енергоспоживанням забезпечує моніторинг і прогнозування споживання енергії в режимі реального часу, автоматичне регулювання розподілу енергії між об'єктами, інтеграцію із зовнішніми системами, взаємодію з енергомережами та енергосистемами інших інфраструктур.

Для забезпечення безпеки експлуатації необхідно вдосконалювати системи резервного енергозабезпечення: автономні генератори, накопичувачі енергії, дублюючі канали живлення [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зважаючи на результати аналізу іноземних та вітчизняних публікацій, розвиток окремих галузей економіки нерозривно пов'язано з транспортними системами, серед яких слід виділити авіаційний транспорт [1-3].

Між тим, ефективність транспортних перевезень, у тому числі авіаційних, безпоседньо залежить від функціонування транспортної інфраструктури [4].

Зважаючи на те, що об'єкти аеродромної інфраструктури мають бути постійно та безперервно забезпеченими електричною енергією, актуальним є питання впровадження сучасних гібридних систем енергоживлення та сучасних адаптивних систем керування ними [5-12].

Між тим, питання забезпечення безпеки функціонування електрифікованих комплексів об'єктів аеродромної інфраструктури залишається актуальним.

Постановка завдання. Метою статті є розробка рекомендацій щодо впровадження інтелектуалізації в системи енергозабезпечення об'єктів аеродромної інфраструктури.

Виклад основного матеріалу. З огляду на підвищену роль цифрових технологій в управлінні енергосистемами, важливо: запобігання несанкціонованому доступу та кіберзагрозам, створення незалежних каналів для обміну критично важливими даними, перевірка безпеки програмного забезпечення та обладнання.

Важливим аспектом також залишається дотримання екологічних стандартів, а саме зменшення викидів CO_2, шляхом оптимізація процесів енергоспоживання та перехід на відновлювані джерела, утилізація відходів шляхом організації систем збору та переробки енергообладнання після закінчення його життєвого циклу, використання екологічно чистих матеріалів, при модернізації інфраструктури аеропортів та аеродромів.

Вдосконалення систем енергозабезпечення об'єктів аеродромної інфраструктури сприяє підвищенню надійності та безпеки функціонування аеропортів. Інтеграція сучасних технологій, зокрема відновлюваних джерел енергії, MicroGrid, а також цифрових систем управління, дозволяє не лише підвищити ефективність, але й відповідати сучасним екологічним стандартам.

Так, ефективне управління промисловим розвитком у сучасних умовах вимагає комплексного підходу. Основні аспекти цієї специфіки можна розглянути через кілька ключових наступних напрямів.

Між тим, технологічні інновації є драйвером для створення нових виробництв і підвищення конкурентоспроможності. Управлінські стратегії мають враховувати впровадження Індустрії 4.0, автоматизації, роботизації та використання штучного інтелекту.

Тож, інфраструктура повинна швидко адаптуватися до змін, включаючи нові потреби споживачів і технологічні тренди.

Вказані напрямки визначають основні завдання сучасного управління галузями економіки, у тому числі транспортної галузі, яке має бути орієнтоване не лише на короткострокові вигоди, але й на довгостроковий сталий розвиток.

В умовах змін глобальної економіки Україні потрібно не лише адаптуватися, а й шукати нові можливості для інтеграції у світовий економічний простір.

Воєнний конфлікт позбавив можливостей нарощування промислового потенціалу висо-

коіндустріалізованих регіонів України, а також спричинив втрату значних обсягів промислового та людського капіталу в Україні. Це не лише поглибило кризові явища у вітчизняній економіці, а й спричинило зростання інвестиційних та інших ризиків.

Водночас існує проблема високої енергозалежності, що наразі не може бути вирішена лише за рахунок розвитку альтернативних джерел енергії.

Адаптація вітчизняної аеродромної інфраструктури до вимог «Зеленого курсу ЄС» є не лише необхідністю для збереження доступу до європейських ринків, але й можливістю підвищити конкурентоспроможність українських компаній. Водночас ця адаптація вимагає системних змін у державній промисловій політиці.

В свою чергу, лідерство матимуть ті галузі, щодо розвитку яких є довгострокове бачення. Щоб впоратися з такими викликами та максимально використати їх можливості, необхідне напрацювання досвіду, зокрема шляхом відновлення контуру стратегічного управління на макро-, мезо– і галузевому рівнях та національного і галузевого форсайтингу.

Глобальні економічні й соціальні досягнення країн у майбутньому формуватимуться під впливом Індустрії 4.0 (інформаційно-комунікативних технологій, технологій автоматизації виробництва, використання нових видів ресурсів) і суттєво вплинуть не тільки на появу принципово нових способів продукування матеріальних і нематеріальних благ, що передбачає заміну звичайних процесів на цифрові, відхід від масового виробництва та індивідуалізацію кінцевого продукту, а й на зміну образу життя, порядку ведення бізнесу та безпеки людства. Порушення у розвитку економіки вцілому, та вагомої ее частини – транспортної галузі, спричиняють фундаментальні зрушення в економічній стабільності у масштабі всієї країни, що може загрожувати її національній безпеці.

Україні, що опинилася перед глобальними викликами, пов'язаними зі стрімким розвитком цифрових технологій, необхідно провести якісні зміни, зумовлені прискоренням адаптації української промисловості до цифрових вимог Індустрії 4.0. Бездіяльність може призвести до того, що українська економіка, у тому числі її транспортна складова втратять свою конкурентоспроможність на світовому ринку.

Для багатьох країн, що розвиваються, такий технологічний динамізм приносить як можливості, так і виклики. З одного боку, цифрові технології Індустрії 4.0 сприяють покращенню комунікації між бізнес-структурами, споживачами та іншими учасниками ринкової економіки.

Технологічне відставання розвитку української економіки підтверджується такими індикаторами, як: низький рівень інноваційної активності, виробництво та експорт високотехнологічної продукції, уповільнення та невпорядкованість інвестиційних та інноваційних процесів; розвиток технологічної платформи (технічні можливості для поширення технологічних трансформацій, доступ до мережі Інтернет, готовність до передачі технологій, оцінка рівня кібербезпеки).

На сучасному етапі розвитку електроніки та енергетики питання забезпечення ефективного та оперативного керування пристроями у складі складних електротехнічних комплексів, в тому числі з елементами розподіленої генерації (залученням альтернативних та відновлювальних джерел) набуває все більшої актуальності. Широке впровадження пристроїв та систем побутової автоматизації, розробка нових інтелектуальних методів керування електроспоживанням додатково підтверджують актуальність досліджень в цьому напрямку [1-4].

MicroGrid – це сучасна концепція організації енергетичних систем, яка відповідає викликам підвищення енергоефективності та розвитку відновлюваних джерел енергії. Основними характеристиками та перевагами MicroGrid є її гнучкість, адаптивність до змін у споживанні та можливість забезпечення автономної роботи.

MicroGrid є важливим інструментом для підвищення енергетичної стійкості, особливо в умовах періодичних збоїв або обмеженого доступу до центральної електромережі.

Внаслідок великої насиченості електротехнічними пристроями, які значно відрізняються за функціональними характеристиками, робочими режимами, рівнем споживання, важливістю для людини, актуальності набувають, зокрема, питання організації єдиної інформаційної інфраструктури. Одним із способів вирішення цієї задачі є організація передачі даних по існуючих силових лініях електричних мереж (PLC – Power Line Communication) [5-7].

Існуючі технології передачі пакетів даних за допомогою технології PLC спрямовані на централізовану організацію мережі. В свою чергу це призводить до залежності кожного з пристроїв від налаштувань серверів, які потребують налагодження та підтримки. З метою збільшення гнучкості організації мережі та керування елек-

тротехнічними пристроями доцільно розглянути однорангові мережі з елементами децентралізації, де кожний окремий модуль PLC реалізує функції керування [8-12].

Автоматичне адресування значно спрощує інтеграцію нових модулів і підвищує загальну ефективність системи, створюючи основу для гнучких і масштабованих мереж.

Впровадження децентралізованих систем управління електроспоживанням у MicroGrid забезпечує підвищення надійності, енергоефективності та гнучкості системи. Однак для досягнення цих цілей необхідно створити ефективну інформаційно-комунікаційну інфраструктуру, яка забезпечує безперервний обмін даними між усіма компонентами системи.

Ефективне управління MicroGrid можливе лише за умови надійної інформаційної інфраструктури, яка забезпечує стабільний обмін даними між усіма учасниками системи.

Електропроводка з точки зору передавання інформаційних сигналів являє собою складне середовище, що має розгалужену, деревоподібну неоднорідну структуру, яка зазнає дії багатьох відомих видів завад.

Для забезпечення надійного обміну даними в умовах завад у мережах, таких як PLC (Power Line Communication), критично важливим є впровадження технологій, які компенсують вплив завад і забезпечують безперебійний інформаційний потік. Це досягається шляхом використання завадостійких кодів та протоколів доступу до мережі.

Авторами запропонована структура схеми впровадження інтелектуалізації в умовах об’єктів аеродромної інфраструктури (рис. 1).

У випадках, коли кілька пристроїв використовують одну мережу для передачі даних, необхідно уникати конфліктів трафіку. Для цього застосовуються спеціальні механізми організації доступу до середовища:

Поєднання методів дозволить значно підвищити надійність і ефективність роботи систем MicroGrid навіть у складних умовах.

Висновки. В даній роботі запропоновано використання модифікованого протоколу з введенням децентрализованого обміну між пристроями на базі протоколу X10 в інформаційній інфраструктурі MicroGrid з реалізацією передавання даних за технологією PLC. У запропонованому способі кожен новий пристрій автоматично реєструється у мережі і взаємодіє з наявними пристроями.

Визначено, що використання децентралізованої стратегії підвищує його гнучкість та можливості узгодженої взаємодії між пристроями системи MicroGrid для реалізації оперативного енергоефективного керування.

Такий підхід дасть можливість інтегрувати процеси інтелектуалізації до систем енергозабезпечення об’єктів аеродромної інфраструктури.

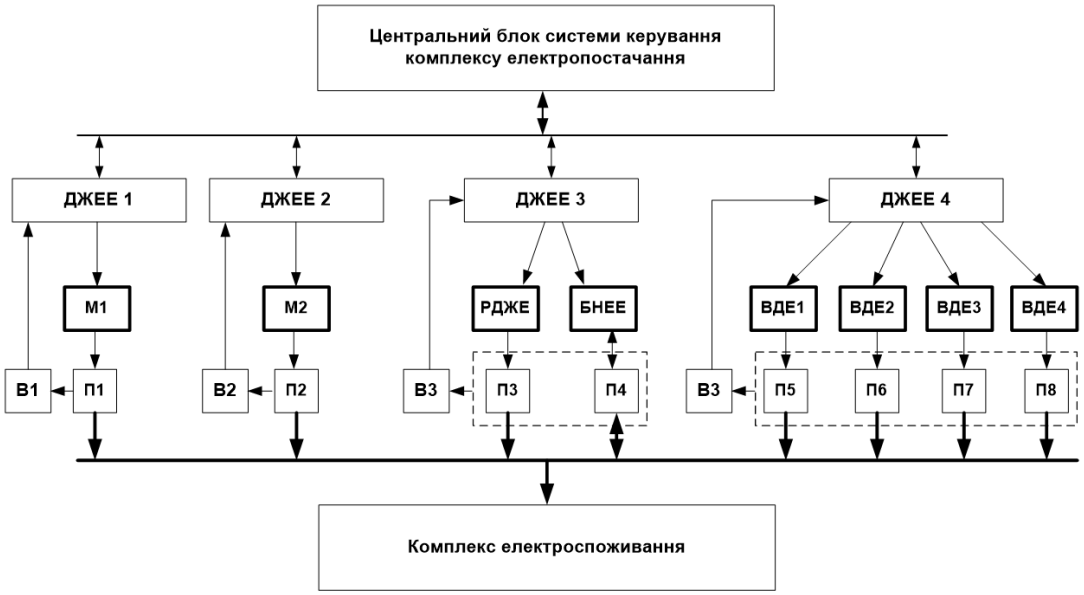


Рис. 1. Запропонованасхема впровадження інтелектуалізації в умовах об’єктів аеродромної інфраструктури

Список літератури:

1. Виклики майбутнього для промислового розвитку України : наукова доповідь / за ред. д-ра екон. наук Л.В. Дейнеко; НАН України, ДУ «Ін-т екон. та прогноз. НАН України». Електрон. дані. К., 2022. 184 с. Режим доступу: http://ief.org.ua/wp-content/uploads/2022/06/Vyklyky-majbutnjogo-dlja-promyslovogo-rozvytky.pdf
2 The Great Reset / The World Economic Forum. 2020. URL: https://www.weforum.org/great-reset
3. Кушніренко О.М. Фінансові механізми прискорення розвитку Індустрії 4.0 в Україні. Проблеми та перспективи забезпечення стійкості фінансової системи України: зовнішні та внутрішні аспекти : збірник матеріалів міжнародної наукової конференції (Київ, 12 травня 2020 р.) / НАН України, ДУ «Ін-т екон. та прогнозув. НАН України». 2020. С. 164–171. URL: http://ief.org.ua/docs/scc/15.pdf
4. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими: За заг. ред.. акад. НАН України О.В. Кириленка Інститут електродинаміки НАН України. К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. 400 с.
5. Жуйков В.Я., Терещенко Т.О., Хохлов Ю.В. Передавання сигналів керування в умовах завад. Навчальний посібник. К.: Аверс, 2010. 256 с.
6. Lantero A. How Microgrids Work [Електронний ресурс] U.S. Department of Energy Режим доступу до ресурсу: https://energy.gov/articles/how-microgrids-work.
7. J. Misurec, P. Mlynek and S. Bezzateev, "The modeling of power line for PLC in smart grids," 2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS), St. Petersburg, 2017, pp. 780-786. doi: 10.1109/PIERS.2017.8261848.
8. Колотов М.В. Передача інформації по лініях електроживлення // Енергоінформ / Укренергозбереження. 2003. №42(224). С. 5–6.
9. Ямненко Ю. С., Желясков Є. О. Дискретні спектральні перетворення Уолша та Адамара та їх застосування для систем розширення спектру. Дванадцята міжнародна науково-практична конференція "Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС-2017". 26-29 червня 2017. 2017. С. 420–424.
10. I. I. Bezukladnikov and A. A. Yuzhakov, "Problems of synchronous and noise immune transmission of information in intelligent mechatronic systems," 2017 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO), Kazan, 2017, pp. 1-4. doi: 10.1109/SINKHROINFO.2017.7997500.
11. Pablo Gagliardo. Take advantage of power line communications in nextgen home networking & IPTV designs. CommsDesign. 2009 (http://www.commsdesign.com/article/printableArticle.jhtml?articleID=217300850)
12. The X-10 PowerHouse Power Line Interface Model # PL513 and Two-way Power Line Interface Model # TW523 [Електронний ресурс] // X-10 (USA) Inc. Режим доступу до ресурсу: http://jvde.us/info/x10_protocol.pdf.

Boiko S.M., Kotov O.B., Zhukov O.A., Reuta A.V., Zhurid V.I., Deryabina I.O. **PROSPECTS FOR IMPLEMENTING INTELLECTUALIZATION INTO ENERGY SUPPLY SYSTEMS OF AIRPORT INFRASTRUCTURE FACILITIES**

The article is devoted to the development of recommendations for the implementation of intelligent technologies in the energy supply systems of airfield infrastructure facilities, which is an important element of the air transport industry infrastructure, in order to ensure safety measures for aircraft operation, which in turn will make it possible to increase the reliability of cargo delivery and passenger transportation. The article defines the main requirements for the power supply systems of airfield infrastructure facilities. It is emphasized that management strategies should take into account the implementation of Industry 4.0, automation, robotization and the use of artificial intelligence. The article, taking into account the global challenges of climate change, draws attention to the implementation of the principles of the green economy, including energy efficiency, decarbonization, the development of renewable energy sources and others. Also, the article emphasizes that at the current stage of development of electronics and energy, the issue of ensuring effective and operational control of devices as part of complex electrical complexes, including those with elements of distributed generation (involving alternative and renewable sources), is becoming increasingly relevant. Therefore, during the operation of the introduction of intelligent systems into the power supply structures of airfield infrastructure facilities, it is advisable to use modern electronic and power semiconductor devices, which will make it possible to improve the controllability of the power supply system and give it flexibility and adaptability. It is proposed to use a modified protocol with the introduction of decentralized exchange between devices based on the X10 protocol in the MicroGrid information infrastructure with the implementation of data transfer using PLC technology. In the proposed method, each new device is automatically registered in the network and interacts with existing devices. It is determined that the use of a decentralized strategy increases its flexibility and the possibility of coordinated interaction between MicroGrid system devices to implement operational energy-efficient control. This approach will make it possible to integrate intellectualization processes into the energy supply systems of airfield infrastructure facilities.

Key words: *air transport, renewable energy sources, aviation safety, airfields, airports, energy infrastructure.*

УДК 656.13
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/37

Євчук Ю.Ю.
Національний університет «Львівська політехніка»

ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗМІНИ ЗАТРИМКИ РУХУ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ ЗА РІЗНИХ СПОСОБІВ ЙОГО ПРІОРИТИЗАЦІЇ

У роботі досліджено особливості руху громадського транспорту на магістральних вулицях із координованим управлінням рухом. Особливу увагу приділено аналізу впливу схем розміщення зупинкових пунктів на ефективність функціонування транспортної системи. Мета дослідження полягає у пошуку оптимальних рішень для зменшення затримок громадського транспорту, зокрема автобусів, за умов забезпечення просторової і часової пріоритизації.

Під час дослідження виявлено, що затримки руху залежать від низки чинників, серед яких інтенсивність руху громадського транспорту та загального потоку, динамічні характеристики транспортних засобів, синхронізація фаз світлофорного регулювання, а також місце розташування зупинкових пунктів. Перенесення зупинок після перехресть у поєднанні з забезпеченням просторового пріоритету шляхом виділення смуги для руху громадського транспорту призводить до значного зменшення затримок як для автобусів, так і для автомобілів загального транспортного потоку, підвищуючи стабільність руху у системах координованого управління.

Результати дослідження, які базуються на натурних вимірюваннях та імітаційному моделюванні у середовищі PTV VISSIM, демонструють значні переваги перенесення зупинкових пунктів громадського транспорту після регульованих перехресть. Це дозволяє зменшити середню тривалість проїзду зони регульованого перехрестя автобусами на 50–55% у порівнянні з розташуванням зупинок перед перехрестями.

Практичне значення отриманих результатів полягає у запропонуванні нових підходів до організації руху громадського транспорту. Зокрема, перенесення зупинок після перехресть дозволяє оптимізувати транспортні потоки, зменшити затримки для громадського транспорту, а також знизити негативний вплив пріоритизації його руху на загальний транспортний потік. Це рішення можна успішно реалізувати на магістральних вулицях із координованим управлінням рухом.

Результати дослідження є важливими для міських агломерацій, де необхідно забезпечити високу пропускну здатність доріг і водночас покращити якість громадського транспорту. Запропоновані підходи сприяють зниженню заторів, скороченню часу проїзду громадським транспортом регульованих перехресть, а також створюють умови для більш стабільного функціонування транспортної системи в умовах високої інтенсивності руху.

Ключові слова: *громадський транспорт, транспортний потік, регульоване перехрестя, виділена смуга, рівень автомобілізації, інтенсивність руху, склад транспортного потоку, часова пріоритизація, просторова пріоритизація.*

Постановка проблеми. На цей час відомо багато різноманітних наукових методів та інженерних практик щодо мінімізації затримки міського наземного громадського транспорту. Застосовуючи різноманітні способи просторової та часової пріоритизації, вдається зменшити простої рухомого складу на регульованих ділянках міських вулиць, збільшити його швидкість на прогонах, а відтак, продуктивність роботи. Одночасне використання сучасних детекторів транспорту, інформаційних систем з GPS-навігацією, електронних систем оплати за проїзд тощо дає можливість розробляти нові підходи у напрямку часової пріоритизації, коли на світлофорних об'єктах рухомий склад проїжджає стоп-лінії з найменшими затримками. Заслуговують на увагу також окремі практики забезпечення просторової пріоритизації, коли облаштовуються виділені смуги руху для громадського транспорту.

Рівень розвитку транспортної системи міста визначається цілим рядом чинників [1, с. 44; 2, с. 23]: галузевою правовою базою; рівнем автомобілізації; принципами організації дорожнього руху; політикою містобудування та землекористування; дорожньою інфраструктурою; організацією і управлінням роботою міського громадського транспорту тощо. У цьому дослідженні основна увага зосереджена на одному з напрямків зниження завантаження рухом транспортної мережі міста, суть якого полягає у підвищенні привабливості громадського транспорту. У статті [3, с. 22] наведено детальний порівняльний аналіз

між різними підходами до транспортного планування, за яких забезпечується мультимодальність, краща транспортна доступність, удосконалення функціональності транспорту тощо. Усі ці заходи у довготерміновій перспективі мають забезпечити переорієнтацію мобільності мешканців з приватного транспорту на громадський, який здатний задовільнити попит на пересування великої кількості людей територією міста, особливо, коли резерви пропускної здатності є практично вичерпаним. Кінцевою метою цих заходів є зменшення витрат часу на пересування.

Аналіз останніх досліджень з цієї проблематики показує, що науковці зосередили свої зусилля за такими трьома основними напрямками:

– управління інтенсивністю руху, вирівнюючи склад транспортного потоку шляхом спеціалізації смуг руху та проїзних частин з одночасним перепланування вуличного простору;

– часова та (або) просторова пріоритизація громадського транспорту залежно від геометричних параметрів проїзної частини та величини пасажирського потоку;

– координоване управління рухом, виходячи з показників щільності вулично-дорожньої мережі, з одночасним забезпеченням пріоритету для громадського транспорту.

Усі вони дозволяють частково розв'язати проблеми з затримками руху на локальному та зональному рівнях, зменшуючи тривалість проїзду транспортних засобів через проблемні ділянки вулично-дорожньої мережі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Щодо першого із зазначених напрямків мінімізації затримок під час пересування, то тут основну увагу зосереджують на вивченні рівня автомобілізації, вирівнювання складу потоку в межах вуличного простору тощо. Так, у роботі [4, с. 43] автори відзначають важливість досліджень складу транспортного потоку під час вибору схеми організації дорожнього руху, адже цей показник характеризує його динамічні показники. Результати їх досліджень свідчать про тісний зв'язок між відносним складом потоків за типами транспортних засобів та показниками черг і затримок на перехрестях. Відтак, кожен спосіб управління рухом має різну ефективність залежно від складу та інтенсивності руху. Для міських умов найбільший вплив на динаміку руху потоку має громадський транспорт. Проте, результати цього дослідження є придатними лише для локального рівня, тобто окремих перехресть.

У статті [5, с. 16] увага акцентується відразу на кількох показниках: рівні автомобілізації, мобільності мешканців, тривалості перебування в русі та вартості пересування. Тут попит на пересування вивчається шляхом проведення опитувань різних груп мешканців – економічно активних людей, несамодіяльних мешканців, осіб, які навчаються. Відзначається, що залежно від групи рівень сприйняття кожного із зазначених показників є різним. До прикладу, для економічно активних людей тривалість перебування в русі є більш важливим чинником у порівнянні з вартістю пересування, ніж для несамодіяльного населення. Такі дослідження дають можливість прогнозувати перерозподіл між поїздками приватними автомобілями та громадським транспортом.

Питання взаємного зв'язку між інтенсивністю руху та затримками, вираженими через довжину черги, розглянуто у роботі [6, с. 9]. Тут автори займаються вивченням шляхів мінімізації затримки через управління роботою світлофорної сигналізації на різних типах перехресть, тобто на локальному рівні. Схожими є результати, наведені у роботах [7, с. 10; 8, с. 13], у яких управління затримками за різної інтенсивності руху на регульованих перехрестях відбувається шляхом вирівнювання складу транспортного потоку.

На відміну від першого напрямку діяльності з мінімізації затримок у транспортних потоках, який переважно вивчає локальний характер, другий (пріоритизація громадського транспорту) вивчає і локальний, і зональний. Надання різних способів пріоритету громадському транспорту забезпечує одночасно вирівнювання складу транспортного потоку, застосування ефективніших алгоритмів керування світлофорною сигналізацією, зменшення затримок, що робить його більш привабливим під час вибору способу пересування містом. У дослідженнях [9, с. 34; 10, с. 406; 11, с. 27; 12, с. 48] розглядається часова пріоритизація громадського транспорту, коли на під'їзді до регульованого перехрестя йому надається пріоритет проїзду у певній фазі. Такий часовий пріоритет може бути активний (надання дозвільного сигналу у циклі регулювання в режимі реального часу), пасивний (оптимізація циклу регулювання шляхом перерозподілу дозвільного сигналу між фазами), частковий (видовження тривалості дозвільного сигналу в очікуванні проїзду рухомого складу громадського транспорту), безумовний (пріоритет надається завжди) та умовний (пріоритет надається лише у випадку відставання від встановленого графіку руху) пріоритети. Часова пріоритизація може бути як локальною, так і зональною. Просторова пріоритизація перед-

бачає облаштування виділених смуг і є найбільш ефективною (з погляду суттєвого зменшення витрат часу на пересування), коли забезпечена на всій протяжності маршруту [13, с. 11]. Поряд із цим, найкращий ефект вдається досягти за одночасного поєднання і часової, і просторової пріоритизації. Такий підхід розглядається дослідниками у працях [14, с. 1464; 15, с. 390]. Тут розглядається мережевий (зональний) підхід до мінімізації затримок в русі громадського транспорту і передбачає беззупинний проїзд рухомого складу. Він має найбільший ефект при координованому управлінні рухом і потребує впровадження вартісних автоматизованих систем управління ним, які в режимі реального часу можуть забезпечувати моніторинг роботи громадського транспорту за одночасного моніторингу черг транспортних засобів у виділених смугах, смугах загального транспортного потоку та кількості пасажирів у рухомому складі.

Постановка завдання. Метою цього дослідження є визначення та аналіз витрат часу на проїзд регульованих перехресть громадським транспортом (автобусами) в умовах координованого управління рухом з урахуванням показників транспортного потоку та способу облаштування зупинкових пунктів. Основними завданнями дослідження є: провести натурні вимірювання показників транспортного потоку на підходах до регульованих перехресть; виявити закономірності зміни затримки руху громадського транспорту під час проїзду перехресть в системі координації за різного способу розміщення зупинкових пунктів; провести імітаційне моделювання процесу роз'їзду черги загального транспортного потоку та автобусів в системі координації.

Виклад основного матеріалу. У системах координованого управління рухом головним завданням є забезпечення проїзду транспортних засобів через всі регульовані перехрестя та пішохідні переходи, які складають цю систему, з найменшими затримка. За будь якого випадку затримки виникатимуть, оскільки групи транспортних засобів мають різні динамічні показники. Як правило, на практиці відстані між сусідніми стоп-лініями є неоднаковими і за великої протяжності (понад 600 м) групи розпадатимуться, особливо при значній неоднорідності транспортного потоку. Інтенсивність руху за таких умов немає великого впливу, за виключенням випадків зі значною часткою лівоповоротних транспортних засобів, оскільки в умовах світлофорного регулювання «впуск» групи через стоп лінію є обмежений тривалістю дозвільного (зеленого) сигналу на «ключовому» перехресті. На міських магістральних вулицях, де координація є можливою, у транспортному потоці часто рухається громадський транспорт. Забезпечення йому беззупинного проїзду за координованого управління часто не вдається, оскільки цей вид транспорту має регламентовані зупинки, де відбувається посадка та висадка пасажирів. Виходячи з цього, стрічки часу необхідно проектувати адаптовано під автобуси (або тролейбуси). Таким чином, для громадського транспорту необхідно забезпечити і просторовий пріоритет у вигляді облаштованих виділених смуг руху, і часовий – з використанням детекторів транспорту, які фіксуватимуть наближення рухомого складу до перехрестя. З метою визначення характеру руху потоку за таких умов та основних чинників впливу на стійкість груп в системі координованого управління проведено дослідження на ділянках магістральної вуличної мережі міста Львова.

Початковим етапом виконання роботи був вибір об'єктів дослідження – регульованих перехресть, на яких проводились вимірювання. Вибір відбувався за такими критеріями:

1. На підході до перехрестя має бути дві смуги руху на досліджуваному напрямку, причому на перехрестях умовного типу I смуги спеціалізуються за прикладом, наведеним на рис. 1, *а*, а на перехрестях умовного типу II крайня права смуга призначена для руху виключно громадського транспорту (рис. 1, *б*).

2. Досліджуваним напрямком обраного регульованого перехрестя мають проходити не менше 5 маршрутів громадського транспорту.

3. Перед стоп-лінією на напрямку руху під час дії заборонного сигналу світлофора має накопичуватись черга транспортних засобів такої довжини, щоб під час її роз'їзду досягалось повне насичення у фазі регулювання.

4. У складі транспортного потоку не має бути великогабаритних вантажних автомобілів, а частка легкових автомобілів у ньому має становити не менше 80%.

5. Зупинкові пункти громадського транспорту облаштовано у заїзних кишенях на підході до регульованого перехрестя.

6. Інтенсивність руху пішоходів на пішохідному переході, через який проїжджають правоповоротні транспортні засоби, є незначною і практично не створює затримку на правій смузі. Лівоповоротні потоки на перехресті не пропускаються із прямими потоками зустрічного напрямку в одній фазі.

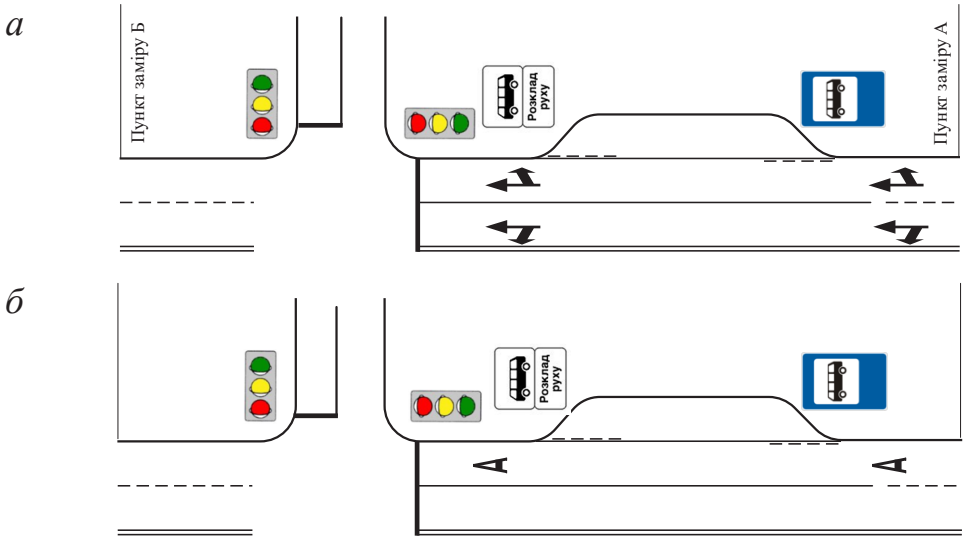


Рис. 1. Планувальні особливості проїзної частини на досліджуваних регульованих перехрестях: а – тип I; б – тип II

Виходячи з наведених критеріїв, обрано 4 підходи до 4 регульованих перехресть з тривалістю фази регулювання на цих підходах відповідно: для типу I – перехрестя 1 – 25 с (тривалість циклу 60 с); перехрестя 2 – 20 с (тривалість циклу 65 с); для типу II – перехрестя 3 – 30 с (тривалість циклу 70 с); перехрестя 4 – 35 с (тривалість циклу 80 с). Проведено вимірювання за 50 циклів на кожному перехресті. Вимірювання відбувалось з дотриманням такої методики:

1. У момент ввімкнення заборонного сигналу на досліджуваному напрямку фіксувались транспортні засоби, які накопичувались у чергу в обох смугах. Під час проведення 5 контрольних замірів на початку вимірювання встановлено, що при дозвільному сигналі тривалістю 20 с (найменша з усіх досліджуваних перехресть) через стоплінію встигає пройти не більше 12 транспортних засобів змішаного загального потоку. Такі контрольні заміри під час експериментального вимірювання необхідні для орієнтовної ідентифікації автомобілів та автобусів, за якими буде вестись спостереження щодо тривалості проїзду через стоп-лінію (окрім правої смуги для перехресть типу II). Виходячи із цього, вдається зафіксувати розміщення пункту заміру А.

2. Із ввімкненням дозвільного сигналу фіксувався проїзд кожного транспортного засобу з черги у пункті заміру Б (розміщений на віддалі 20 м за перехрестям).

3. Використовуючи відеокамери, між якими було узгоджено часові показники секундоміра, фіксувались: тривалість проїзду кожного транспортного засобу між пунктами заміру А та Б; кількість та тип транспортних засобів, які перетнули стоп-лінію у кожному напрямку або проїхали прямо.

4. Під час розрахунку фактичної інтенсивності виїзду транспортних засобів з досліджуваної смуги для кожного перехрестя враховувалась кількість циклів протягом однієї години.

5. Розрахунок зведеної інтенсивності руху відбувався із використанням коефіцієнтів зведення, наведених у таблиці 4.1 ДБН В.2.3-5:2018 «Вулиці та дороги населених пунктів».

6. Розрахунок середньої тривалості проїзду перехрестя одним транспортним засобом включає в себе проміжок часу, за який він проїде між пунктами заміру А та Б.

Зведені результати вимірювань наведено у таблиці 1. Аналізуючи результати можна сказати, що на тривалість проїзду одним транспортним засобом відстані між пунктами заміру А та Б впливатиме: тривалість заборонного сигналу; затримка у правій смузі, спричинена правоповоротними транспортними засобами; затримка у лівій смузі, спричинена зменшенням швидкості під час виконання маневру повороту; затримка у правій смузі, спричинена заїздом та виїздом громадського транспорту із заїзної кишені; затримка рухомого складу громадського транспорту на зупинковому пункті, спричинена тривалістю посадки та висадки пасажирів; місцем знаходження транспортного засобу в черзі перед почат-

Таблиця 1

Результати експериментальних вимірювань роз'їзду черги транспортних засобів на регульованих перехрестях

Тип транспортного засобу (ТЗ)	Середня кількість ТЗ, які пройшли через стоп-лінію на 1 цикл, од.		Середня фактична інтенсивність руху, авт./год		Зведена інтенсивність руху, од./год		Середня тривалість проїзду перехрестя 1 ТЗ, с (ПС/ЛС)
	Права смуга (ПС)	Ліва смуга (ЛС)	ПС	ЛС	ПС	ЛС	
Перехрестя 1, Тип I (60 циклів в 1 год.)							
легкові	11,6	13,1	696	786	754	827	61/53
вантажні до 6 т	0,4	0,45	24	27			
автобуси великої місткості	0,2	–	12	–			
Перехрестя 2, Тип I (55 циклі в 1 год.)							
легкові	9,4	12,3	517	677	564	719	68/60
вантажні до 6 т	0,35	0,5	19	28			
автобуси великої місткості	0,18	–	10	–			
Перехрестя 3, Тип II (51 цикл в 1 год.)							
легкові	–	15,4	–	785	20	869	28/60
вантажні до 6 т	–	1,1	–	56			
автобуси великої місткості	0,21	–	11	–			
Перехрестя 4, Тип II (45 циклів в 1 год.)							
легкові	–	17,3	–	779	22	914	31/67
вантажні до 6 т	–	2	–	90			
автобуси великої місткості	0,26	–	12	–			

ком вимірювання (в пункті заміру А); тривалістю руху в зоні перехрестя та поза ним до пункту заміру Б.

З теоретичних досліджень та практики відомо, що виділення окремої смуги (як правило правої) виключно для руху громадського транспорту, спричиняє збільшення довжини черги у лівій смузі, яка обслуговує загальний транспортний потік. Виходячи з цього, важливо забезпечити такі алгоритми управління світлофорною сигналізацією, які б були здатні «компенсувати» втрати часу для цієї групи учасників дорожнього руху. Таким заходом може бути впровадження координованого управління рухом на всій протяжності магістральної вулиці. Його можна і доцільно впроваджувати, проте виникає деяка проблема у смугах громадського транспорту. Суть цієї проблеми полягає в тому, що під час надання автобусам (тролейбусам, трамваям) часового пріоритету на підході до стоп-лінії (або під час виїзду з зупинкового пункту) відбувається перерахунок циклу світлофорного регулювання у всіх фазах окремого ізольованого перехрестя, а в системі координованого управління необхідно перерахувати (нехай навіть із застосуванням відповідних детекторів транспорту) всю стрічку часу у коридорі (системі регульованих перехресть) на всій протяжності вулиці. Розв'язок цієї проблеми може полягати у наступному. При координованому управлінні рухом автобуси можуть під'їжджати до стоп-лінії у момент ввімкнення заборонного сигналу, оскільки мали регламентовану затримку на зупинковому пункті, тому для них «руйнується» стрічка часу в системі координації. Висунемо гіпотезу, що зменшити вплив цього негативного чинника в умовах координації можна шляхом перенесення зупинкового пункту після перехрестя (рис. 2). Для встановлення достовірності цієї гіпотези проведемо імітаційне моделювання у спеціалізованому програмному середовищі PTV VISSIM щодо визначення зміни тривалості проїзду громадським транспортом обох типів регульованих перехресть при інтенсивностях руху, яка наведена у таблиці 1.

Під час моделювання відстань між пунктами заміру А та Б залишалась незмінною. У PTV

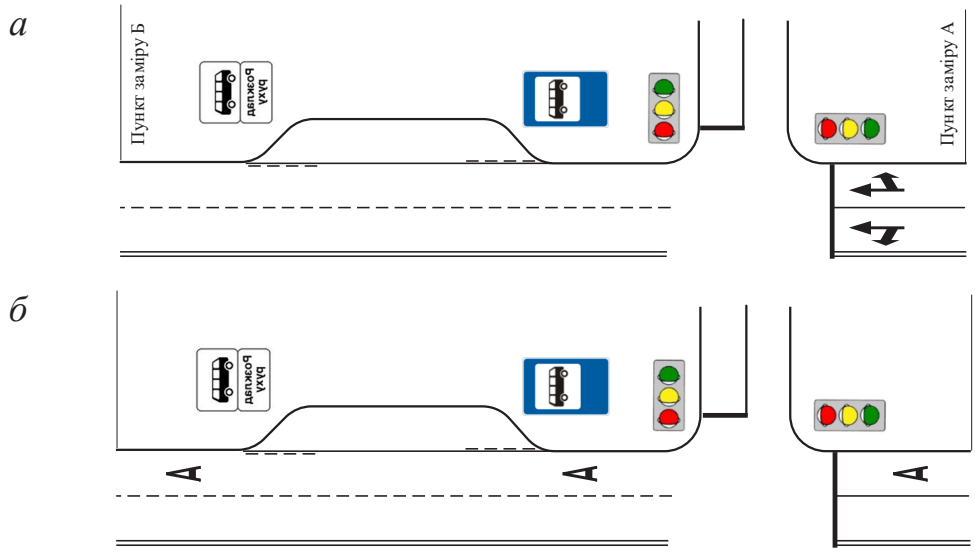


Рис. 2. Схема організації руху для імітаційного моделювання на досліджуваних регульованих перехрестях: *а* – тип I; *б* – тип II

Таблиця 2

Результати імітаційного моделювання роз'їзду черги транспортних засобів на регульованих перехрестях

Об'єкт дослідження	Середня тривалість проїзду 1 автобусом зони регульованого перехрестя, с		
	Розміщення зупинкових пунктів перед перехрестям		Розміщення зупинкових пунктів після перехрестя з часовим пріоритетом для автобуса в умовах координації
	Результати натурних вимірювань	Результати імітаційного моделювання	Результати імітаційного моделювання
Перехрестя 1 (Тип I)	61	54	36
Перехрестя 2 (Тип I)	68	59	38
Перехрестя 3 (Тип II)	28	24	16
Перехрестя 4 (Тип II)	31	29	15

VISSIM такі пункти називаються лічильниками транспортних засобів. Спершу проведено моделювання тривалості проїзду автобусами чотирьох підходів до перехресть за умови розміщення зупинкового пункту перед перехрестям (рис. 1) для визначення рівня збіжності з результатами натурних вимірювань, а пізніше з розміщенням зупинкових пунктів після перехрестя (рис. 2).

Результати імітаційного моделювання наведено у таблиці 2.

Результати моделювання, наведені у таблиці 2, свідчать про: близькість між результатами натурних експериментальних вимірювань та імітаційного моделювання; суттєве зменшення затримок і автобусів, і автомобілів загального транспортного потоку на всіх типах перехресть. При чому, враховуючи ту особливість, що більші тривалості проїзду транспортними засобами перехресть типу I, зокрема у правій смузі зумовлені затримками в русі автобусів (і через затримку на зупинковому пункті, і через вплив їх динамічних габаритів), то ефекту (зменшення тривалості проїзду) від перенесення зупинкового пункту можна досягти і для автомобілів загального транспортного потоку.

Висновки. За результатами досліджень, наведених у цій роботі можна стверджувати наступне:

1. Основними чинниками, які визначають зміну тривалості проїзду, а відтак і затримку руху, громадським транспортом регульованих перехресть є інтенсивність руху самого громадського транспорту та загального транспортного потоку, спосіб пріоритизації руху громадського транспорту та розміщення зупинкового пункту відносно перехрестя.

2. На магістральних вулицях з координованим рухом з метою забезпечення одночасно і просторової, і часової пріоритизації громадського транспорту зупинкові пункти слід розміщувати після

проїзду перехрестя, незалежно від розміщення місць генерації пасажирських потоків.

3. За практично однакових режиму світлофорного регулювання та геометричних параметрів проїзної частини тривалість проїзду автобусами (тролейбусами) зони регульованого перехрестя на виділених смугах є на 50–55% меншою у порівнянні зі схемами руху, коли вони рухаються у структурі загального транспортного потоку.

4. Забезпечення одночасної часової та просторової пріоритизації громадського транспорту в умовах координованого управління рухом на двосмугових магістральних вулицях (облаштовані заїзні кишені зупинкових пунктів після проїзду перехрестя) дозволяє зменшити тривалість проїзду ним зони дії регульованих перехресть, а також всієї вулиці у приблизно 3–4 рази порівняно з схемами руху, коли цей вид транспорту рухається у змішаному загальному потоці і має зупинкові пункти перед перехрестями.

Список літератури:

1. Форнальчик Є.Ю. Ройко Ю.Я., Гілевич В.В. Розвиток науково-прикладних основ управління транспортними потоками: монографія / за ред. Є. Ю. Форнальчика. Львів: Видавництво Львівської політехніки. 2022. 180 с.

2. Біліченко В. В., Крещенський В. Л., Цимбал С. В., Тодорашко Г. Ю. Комплексний підхід до вирішення існуючих проблем функціонування транспортної системи міста. *Наукові нотатки*. 2016. №55. С. 22–25.

3. Litman T. The New Transportation Planning Paradigm. *ITE Journal.* 2013. P. 20–28.

4. Postranskyy T., Boikiv M., Afonin M., Rogalskyi R. Selection of a traffic management scheme at an intersection taking into consideration the traffic flow composition. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* Харків: УкрДУЗТ, 2020. Вип. 1/3(103). С. 39–46. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.195327

5. Drliciak M., Celko J., Cingel M., Jandacka D. Traffic Volumes as a Modal Split Parameter. *Sustainability.* 2020. №12 (24), 10252. https://doi.org/10.3390/su122410252

6. Dixit V., Nair DJ., Chand S., Levin MW. A simple crowdsourced delay-based traffic signal control. *PLoS ONE.* 2020 №15 (4): e0230598. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230598

7. Ruan T., Zhou L., Wang H. Stability of heterogeneous traffic considering impacts of platoon management with multiple time delays. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications.* 2021 №583, 126294. https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.126294

8. Zhong, Z., Lee E. E., Nejad M., Lee J. Influence of CAV clustering strategies on mixed traffic flow characteristics: An analysis of vehicle trajectory data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies.* 2020. №115, 102611. https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102611

9. Fornalchyk Ye., Vikovych I., Royko Yu., Hrytsun O. Improvement of methods for assessing the effectiveness of dedicated lanes for public transport. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2021. №1/3 (109). P. 29–37. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225397

10. Malandraki G., Papamichail I., Papageorgiou M., Dinopoulou V. Simulation and Evaluation of a Public Transport Priority Methodology. *Transportation Research Procedia.* 2015. №6. P. 402–410. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2015.03.030

11. Furth P., Muller T. Conditional Bus Priority at Signalized Intersections: Better Service Quality with Less Traffic Disruption. *Transportation Research Record.* 2000. №1731. – P. 23–30. https://doi.org/10.3141/1731-04

12. Yang M., Sun G., Wang W. et al. Evaluation of the Pre-Detective Signal Priority for Bus Rapid Transit: Coordinating the Primary and Secondary Intersections. *Transport.* 2018. №33 (1). P. 41–51. https://doi.org/10.3846/16484142.2015.1004556

13. Royko Yu., Ye. Fornalchyk, E. Koda, I. Kernytskyy, O. Hrytsun, R. Bura, P. Osinski, A. Markiewicz, T. Wierzbicki, R. Barabash, R. Humenuyk, P. Polyansky. Public Transport Prioritization and Descriptive Criteria-Based Urban Sections Classification on Arterial Streets. *Sustainability.* 2023. No. 15. P. 1–15. https://doi.org/10.3390/su15032363

14. Zyryanov V., Mironchuk A. Simulation Study of Intermittent Bus Lane and Bus Signal Priority Strategy. *Procedia Social and Behavioral Sciences.* 2012. №48. P. 1464–1471. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.1122

15. Basbas S. Evaluation of bus lanes in central urban areas through the use of modelling techniques. *Urban Transport X.* 2004. P. 389–397.

Yevchuk Yu.Yu. PATTERNS OF CHANGES IN PUBLIC TRANSPORT DELAYS IN DIFFERENT WAYS OF ITS PRIORITIZATION

The article investigates the peculiarities of public transport movement on main streets with coordinated traffic control. Particular attention is paid to analyzing the impact of stopping point layouts on the efficiency of the transport system. The purpose of the study is to find optimal solutions to reduce delays in public transport, in particular buses, while ensuring spatial and temporal prioritization.

The research has shown that traffic delays depend on a number of factors, including the intensity of public transport and general traffic, dynamic characteristics of vehicles, synchronization of traffic light phases, and the location of stopping points. Relocating stops after intersections, combined with providing spatial priority by allocating a lane for public transport, leads to a significant reduction in delays for both buses and cars in the general traffic flow, increasing traffic stability in coordinated control systems.

The results of the research, which are based on field measurements and simulation modeling in the PTV VISSIM environment, demonstrate significant advantages of relocating public transport stops after controlled intersections. This allows to reduce the average travel time of buses through the zone of a controlled intersection by 50–55% compared to the location of stops before the intersections.

The practical significance of the results obtained is to propose new approaches to the organization of public transport. In particular, relocating stops after intersections allows optimizing traffic flows, reducing delays for public transport, and minimizing the negative impact of traffic prioritization on the overall traffic flow. This solution can be successfully implemented on main streets with coordinated traffic management.

The results of the research are important for urban agglomerations, where it is necessary to ensure high road capacity and at the same time improve the quality of public transport. The proposed approaches help to reduce congestion, shorten travel times for public transport at regulated intersections, and create conditions for a more stable functioning of the transport system in conditions of high traffic intensity.

Key words: *public transport, traffic flow, controlled intersection, dedicated lane, motorization level, traffic intensity, traffic composition, time prioritization, spatial prioritization.*

УДК 656.2
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/38

Карапиш А.С.
Український державний університет науки і технологій

Харченко О.І.
Український державний університет науки і технологій

Баркалова Н.О.
Український державний університет науки і технологій

ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ ФОРМУВАННЯ ОЦІНОЧНИХ ПОКАЗНИКІВ СТІЙКОГО РОЗВИТКУ

У статті розглядаються оціночні показники стійкого розвитку залізничного транспорту в Україні в умовах війни та післявоєнного відновлення. Визначена роль залізничної інфраструктури як елементу економічної стабільності та розвитку країни завдяки перевезенням та міжнародній торгівлі. Окреслено важливість модернізації транспортної мережі, впровадження інноваційних технологій та інтеграції залізничного транспорту до європейських стандартів, що сприятиме зменшенню викидів вуглекислого газу, підвищенню ефективності перевезень і забезпеченню безпеки. Розглянуто інвестиційні можливості для стійкого розвитку транспортного сектору, включаючи модернізацію рухомого складу, електрифікацію та інтеграцію інтелектуальних транспортних систем для підвищення конкурентоспроможності та зниження екологічного навантаження. Для досягнення поставленої мети розкривається суть сталого розвитку транспортного сектору. Під цим терміном розуміють розвиток, який здатний забезпечити збалансоване вирішення соціально-економічних проблем, скорочення негативного впливу на довкілля та задоволення поточних і майбутніх потреб різних сфер та галузей людської діяльності. Запропоновано новий підхід до формування системи показників, що відображають сталий розвиток підрозділів залізничного транспорту, на відміну від наявних кількісних показників, які не дозволяють оцінити ефективність заходів та забезпечити сталий розвиток. Показники, розроблені у межах цього дослідження, дають змогу оцінювати діяльність підрозділів залізничного транспорту з точки зору сталого розвитку, включаючи впровадження ресурсозберігаючих технологій, зниження техногенного впливу на довкілля, забезпечення соціальної складової розвитку та підвищення якості обслуговування клієнтів. Практична значущість. Наразі структурна реформа залізничного транспорту України потребує швидкого вирішення завдань з підвищення ефективності роботи галузі. Інтегральний показник сталого розвитку, запропонований у цьому дослідженні, дозволяє оцінювати ефективність роботи підрозділів залізничного транспорту з позиції сталого розвитку.

Ключові слова: *стійкий розвиток, залізничний транспорт, інвестиції, інноваційні технології, екологічність, модернізація, відновлення інфраструктури, логістичні маршрути, транспортні системи.*

Постановка проблеми. Теоретичні та практичні показники стійкого розвитку транспортного сектору в Україні набувають особливої важливості в умовах сьогодення. Проблема стосується не тільки забезпечення ефективного функціонування національної транспортної системи, так і її адаптації до змін, викликаних глобальними економічними кризами та міжнародними торгівельними тенденціями. Розвиток залізничного транспорту є важливим елементом стратегії стійкого розвитку, який вимагає удосконалення не тільки з точки зору економічної ефективності, але й безпеки, надійності та стійкості до сучасних викликів.

В умовах війни, коли транспортна інфраструктура зазнає значних руйнувань, питання стійкого розвитку залізничного транспорту набуває нових вимірів. Зокрема, проблема полягає в адаптації залізничої системи до європейських стандартів, що дасть можливість для розвитку транзитного потенціалу через сусідні країни та забезпечить альтернативними логістичними шляхами для відновлення перевезень вантажів і пасажирів. Рішаючим фактором є забезпечення безперебійної роботи залізниць та їх відповідність новим економічним реаліям.

Дослідження ефективного реформування транспортної інфраструктури та стійкого розвитку

залізничного транспорту стає основним завданням для науковців і практиків. Окреме питання – пристосування інфраструктури до наслідків від руйнувань та швидке реагування для перенаправлення вантажопотоків через безпечні та стабільні логістичні коридори.

Таким чином, формування оціночних показників стійкого розвитку залізничної інфраструктури України неможливе без врахування внутрішніх і зовнішніх економічних факторів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У статті розглядається ряд теоретичних аспектів стійкого розвитку залізничного транспорту в Україні. У роботах Дикань В.Л., Кузнецов Є.М., Каличева Н.Є., Субота М.В., Лазоренко Т., Шолом І., Марценюк К., Хабутдінов Р.А. [7–11], розглядаються теоретичні та практичні аспекти формування стійких показників для транспортної інфраструктури. Однак ці дослідження відображають загальні підходи до стійкості. Відновлення залізничної мережі України в післявоєнний період потребує ґрунтовного аналізу.

Наявні підходи до розвитку транспортної інфраструктури в Україні не достатньо враховують вплив руйнувань, що призводить до необхідності розробки нових методів, розробка яких відкриває нові аспекти вивчення інтеграції екологічних і соціальних факторів у загальну модель оцінки стійкості залізничного транспорту в Україні.

Постановка завдання. Метою дослідження є обґрунтування важливості розвитку та модернізації залізничного транспорту в Україні для забезпечення ефективної роботи залізничної мережі в умовах війни, а також для адаптації до європейських стандартів.

Основні цілі статті:

– Сформувати напрямки модернізації залізничної інфраструктури та їх вплив на стійкий розвиток.

– Розглянути екологічний, соціальний та економічний показники стійкого розвитку залізничного транспорту в контексті війни та пошкодження інфраструктури.

– Викласти інвестиційні можливості та переваги модернізації залізничної мережі для зменшення викидів, підвищення ефективності перевезень та поліпшення безпеки.

– Роль інноваційних технологій у логістичних ланцюгах і взаємодії з іншими видами транспорту.

Виклад основного матеріалу. Розвиток економіки України, зміцнення зовнішньоекономічних зв'язків з країнами Європи та тенденція до підвищення мобільності населення роблять стабільну та ефективну роботу транспортної галузі ключовою для забезпечення стійкого розвитку держави. Залізничний транспорт відіграватиме надзвичайно важливу роль для відновлення інфраструктури, перевезення гуманітарних вантажів, повернення населення, підтримки міжнародної торгівлі.

В травні 2018 року Кабінет Міністрів України схвалив «Національну транспортну стратегію України до 2030 року» [1]. В ній визначено ряд напрямів розвитку для залізничного транспорту:

– Оновлення та покращення інфраструктури;

– Розвиток вантажних перевезень;

– Адаптація Української залізничної мережі до європейських стандартів;

– Розвиток високошвидкісного залізничного транспорту;

– Впровадження інформаційних технологій;

– Підвищення рівня безпеки та комфорту під час перевезень.

В цілому «Транспортна стратегія України до 2030 року» має три основні показники: екологічний, економічний та соціальний, які сприяють досягненню стійкого розвитку транспортної галузі України в змінюваних економічних та екологічних умовах.

За даними Європейського агентства з охорони навколишнього середовища (EEA) [2] середні викиди від залізничного транспорту складають близько 15–30 г CO_2/пас-км для пасажирських перевезень, та 10–20 г CO_2/т-км для вантажних перевезень. Що робить його одним за найбільш екологічних видів транспорту.

За даними міжнародного енергетичного агентства (IEA) [3] викиди CO2 від роботи дизельних залізниць за останні 20 років збільшувалися в середньому на 0,6% щорічно. Стійкий розвиток транспортної інфраструктури передбачає задоволення транспортних потреб віддаючи пріоритет захисту довкілля, збереженню невідновлювальних ресурсів та здоров'я людей [4]. Залізничний транспорт є одним із найбільш екологічно чистих видів транспорту, водночас в умовах постійного розвитку альтернативних джерел, щоб зберегти і покращити цю характеристику, необхідні інвестиції в модернізацію рухомого складу та інфраструктури. Так, перехід на електричні локомотиви або використання альтернативних джерел енергії може значно знизити рівень викидів вуглекислого газу. Інвестиції в інноваційні технології сприяють розвитку електрифікації, що робить систему залізниць менш залежною від коливань цін на нафту та паливо.

Рис. 1. Статистика викидів вуглекислого газу на 1 км

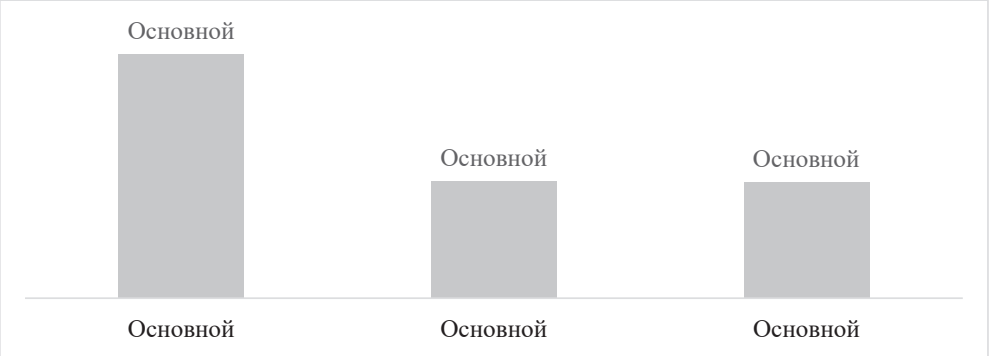


Рис. 2. Динаміка перевезення вантажу залізничним транспортом [5]

Соціальний показник стійкого розвитку передбачає вирішення питань безпеки перевезень і комфорту пасажирів, а також вплив транспорту на зайнятість населення та розвиток міст і громад. В умовах війни важливою є модернізація інфраструктури для підтримки перевезень гуманітарних вантажів, а також відновлення транспортної доступності для громадян, що повертаються в країну.

Економічні чинники стійкого розвитку транспортної інфраструктури включають в себе гармонію цілей та функціонування систем. Основними цілями є отримання прибутку, економічне зростання та підвищення конкурентоспроможності. Війна розв'язана російською федерацією значно вплинула на вантажні та пасажирські перевезення залізничним транспортом. Як показують дані Держстату, у 2022 році, обсяг перевезених вантажів залізничним транспортом скоротився на 52,1% порівняно з 2021 роком [5], і в 2023 році показники лишилися менші ніж були до війни.

Це наслідки не тільки руйнування інфраструктури, а й зміни в структурі логістичних ланцюгів, перенаправленні вантажопотоків до більш безпечних маршрутів. Тому відновлення інфраструктури та розвиток нових логістичних коридорів через менш уражені території має стратегічне значення для економічного відновлення України в умовах війни. Тож інвестиції в залізничний транспорт є ключовим чинником стійкого розвитку цієї галузі, особливо в умовах сучасних економічних та геополітичних змін [6–7]. Приведення національної залізничної транспортної системи до європейських стандартів дозволяє розширити транзитний потенціал, забезпечити альтернативні маршрути для перевезень вантажів та пасажирів через безпечні території.

Важливою гіпотезою цього процесу є застосування математичних та логістичних методів, концепцій і функцій, що дозволяє значно зменшити витрати ресурсів і сприяє зниженню негативного впливу на навколишнє середовище [8]. Однією з основних інновацій є впровадження систем моніторингу та автоматизації перевезень, які дозволяють знизити витрати на управління і контроль, покращити безпеку руху та забезпечити точність і оперативність перевезень. Цифрові платформи здійснюють оптимізацію логістичних ланцюгів, забезпечуючи кращу взаємодію між різними видами транспорту та знижуючи час затримок [9].

Створення математичних моделей для оптимізації логістичних ланцюгів дозволяє знаходити

більш ефективні маршрути, знижувати витрати на перевезення вантажів і пасажирів, забезпечуючи їх ефективність і зниження викидів вуглецю. Алгоритми оптимізації, як-от методи лінійного програмування або генетичні алгоритми, широко використовуються для вирішення таких завдань [10].

Ще один важливим напрям – розвиток інтелектуальних транспортних систем (ITS), які включають в себе автоматизовані рішення для управління рухом, моніторингу вантажів і пасажирів, а також для інтеграції з іншими транспортними мережами. Ці системи дозволяють інтегрувати різні види транспорту та мінімізувати затримки, що покращує логістичні коридори, знижуючи витрати та підвищуючи швидкість обробки вантажів. Для математичного моделювання в цьому випадку можуть застосовуватися методи теорії графів і оптимізаційного програмування [11–12]. Система «розумних» перевезень, в яку інтегровані новітні технології, дозволяє знижувати затрати на транспортування та покращувати ефективність перевезень, зокрема через використання різних видів транспорту (залізничного, водного, автомобільного) для покращення логістичних коридорів.

Залізничний транспорт може забезпечити більш стійкий розвиток, зокрема досягнення цілей зменшення викидів, підвищення ефективності перевезень та покращення взаємодії з іншими видами транспорту. Це сприяє зростанню конкурентоспроможності національних залізничних компаній, підвищенню їх надійності та здатності адаптуватися до нових вимог ринку.

Ефективне використання ресурсів з використанням логістичних рішень сприяє вдосконаленню виробничих процесів, що дозволяє досягти як економічних, так і соціальних та екологічних цілей суспільства.

Висновки. Відставання стійкого розвитку залізничного транспорту в України викликано значними пошкодженнями інфраструктури та відставанням в оновленні технічних і технологічних стандартів. Війна, розв'язана російською федерацією, зруйнувала значну частину залізничних мереж, що призводить до нестабільності та зниження ефективності критичного для підтримки економіки країни транспорту. Це ускладнює внутрішнє перевезення вантажів і пасажирів, а також збільшує залежність від міжнародного транспорту для переміщення товарів та гуманітарної допомоги.

Відставання в транспортній інфраструктурі під час відновлення своєї економіки та інтегрування в європейський економічний простір, може стати серйозною загрозою для національної безпеки і розвитку України. Технічне старіння транспорту й високі ризики для безпеки перевезень у зв'язку з постійними бойовими діями підривають конкурентоспроможність та підвищують екологічне навантаження. Нажаль стійкий розвиток залізничної інфраструктури неможливий без значних капітальних інвестицій. Інвестиції в модернізацію інфраструктури дозволяють знизити витрати, підвищити ефективність та зменшити негативний вплив на навколишнє середовище, що покращує економічні показники та сприяє соціальній стабільності. Застосування логістичних рішень та інтеграція новітніх технологій, таких як автоматизація управління рухом, допомагає знизити операційні витрати та поліпшити енергетичну ефективність.

Для нашої країни важливе не тільки відновлення інфраструктури після руйнувань, але й модернізація транспортних мереж, впровадження новітніх технологій та екологічно чистих видів транспорту. Ці засади дадуть можливість забезпечити стабільність та швидкість перевезень, а також підвищити економічну безпеку та ефективність в умовах війни та майбутньої європейської інтеграції.

Список літератури:

1. Офіційний сайт Кабінету Міністрів України. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року. URL: https://www.kmu.gov.ua/ua/npas/pro-shvalennyastrategiyi-ukrayini-na-period-do-2030roku7 (відкритий доступ, назва з екрану, дата звернення 9.11.2024)

2. Офіційний сайт. Європейське агентство з охорони навколишнього середовища (EEA). URL: https://www.eea.europa.eu/themes/transport (відкритий доступ, назва з екрану, дата звернення 9.11.2024)

3. Офіційний сайт. Міжнародне енергетичне агентство (IEA). URL: https://www.iea.org/energy-system/transport/rail (відкритий доступ, назва з екрану, дата звернення 9.11.2024)

4. Сталий розвиток: світоглядна ідеологія майбутнього: монографія / За ред. Акад. НААН України М. А. Хвесика. К.: Вид-во ДУ Ін-ту економіки природокористування та сталого розвитку НАН України, 2012. 465 с. (відкритий доступ, назва з екрану, дата звернення 9.11.2024)

5. Офіційний сайт. Державна служба статистики України. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/ (відкритий доступ, назва з екрану, дата звернення 9.11.2024)

6. Дикань В.Л., кузнецов Є.М. Методичне забезпечення формування стратегії сталого розвитку підприємств залізничного транспорту. *Вісник економіки, транспорту і промисловості*. 2023. № 84. DOI: https://doi.org/10.18664/btie.84.301226

7. Каличева Н. Є. Теоретико-методологічні засади забезпечення конкурентоспроможності підприємств залізничного транспорту в умовах трансформації бізнес-середовища : автореф. дис. … д-р екон. наук: 08.00.04. Харків, 2019. 43 с.

8. Субота М.В. Соціально-економічна безпека сталого розвитку підприємств: автореф. дис. … д-ра екон. наук: 08.00.04. Кам'янець-Подільський, 2021. 42 с.

9. Лазоренко Т., Шолом І. Теоретичні засади концепції управління стійким розвитком підприємства. *Галицький економічний вісник. Менеджмент*. 2020. Т. 6. № 67. С. 175–184.

10. Марценюк Л., Шніпов В., Марценюк К. Напрями сталого розвитку залізничного транспорту України. *Науковий вісник Дніпровського державного університету внутрішніх справ: Науковий журнал*. 2024. № 2 (129). С.153-163. http://%20doi.org%20/10.31733/2078-3566-2024-2-153-163

11. Хабутдінов Р.А. Методологія концептуального управління технологічно-сталим розвитком на автотранспорті. *НТУ Національний трапсортний університет*. 2023. URL: http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/51/408_415.pdf (відкритий доступ, назва з екрану, дата звернення 9.11.2024)

12. Kharchenko O., Okorokov A., Vernigora R., Tsuprov P., Papakhov O., Logvinova N. Capital investments in the context of sustainable development of railways, *MATEC Web of Conferences* 294, 04003, 2019. EOT-2019. https://doi.org/10.1051/matecconf/201929404003 (відкритий доступ, назва з екрану, дата звернення 9.11.2024)

13. Kharchenko O. Mathematical model of railway functioning from the perspective of sustainable development. *Економіка та управління. Науковий вісник НГУ*. 2017. № 1. URL: file:///C:/Users/User/Downloads/01_2017_Kharchenko.pdf (відкритий доступ, назва з екрану, дата звернення 9.11.2024)

Karapysh A.S., Kharchenko O.I., Barkalova N.O. THEORETICAL FOUNDATIONS FOR FORMING SUSTAINABILITY INDICATORS

The article considers the estimated indicators of sustainable development of railway transport in Ukraine in the conditions of war and post-war recovery. The role of railway infrastructure as an element of economic stability and development of the country due to transportation and international trade is defined. The importance of the modernization of the transport network, the introduction of innovative technologies and the integration of railway transport to European standards is outlined, which will contribute to reducing carbon dioxide emissions, increasing the efficiency of transport and ensuring safety. Investment opportunities for sustainable development of the transport sector are considered, including modernization of rolling stock, electrification and integration of intelligent transport systems to increase competitiveness and reduce environmental burden. To achieve the goal, the essence of sustainable development of the transport sector is revealed. This term means development that is capable of providing a balanced solution to socio-economic problems, reducing the negative impact on the environment, and meeting the current and future needs of various spheres and branches of human activity. A new approach to the formation of a system of indicators reflecting the sustainable development of railway transport divisions is proposed, in contrast to the existing quantitative indicators that do not allow assessing the effectiveness of measures and ensuring sustainable development. The indicators developed within the framework of this study make it possible to evaluate the activities of railway transport units from the point of view of sustainable development, including the implementation of resource-saving technologies, reducing the man-made impact on the environment, ensuring the social component of development and improving the quality of customer service. Practical significance. Currently, the structural reform of the railway transport of Ukraine requires a quick solution to the tasks of increasing the efficiency of the industry. The integrated indicator of sustainable development, proposed in this study, allows to evaluate the efficiency of railway transport units from the standpoint of sustainable development.

Key words: *sustainable development, rail transport, investments, innovative technologies, environmental sustainability, modernization, infrastructure recovery, logistics routes, transport systems.*

УДК 656.612:621.6.033
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/39

Кравченко О.А.
Одеський національний морський університет

Луговой Т.А.
Одеський національний морський університет

ОГЛЯД НОВІТНІХ ДЛЯ УКРАЇНИ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ СКОРОЧЕННЯ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ НА ЕКОЛОГІЮ ПІД ЧАС МОРСЬКОГО ПЕРЕВЕЗЕННЯ ВУГЛЕВОДНІВ

У статті розглянуто новітні технології для зменшення екологічного впливу транспортування вуглеводнів в Україні. Проведено огляд і порівняння існуючих і інноваційних транспортних рішень, які можуть суттєво зменшити екологічний слід. Визначено основні фактори, що впливають на навколишнє середовище під час перевезення вуглеводнів морським транспортом. ***Метою*** *даної статті є виявлення сучасних технологій для скорочення екологічного впливу транспортування вуглеводнів. Окреслено три ключові новітні технології: двигуни з системою рециркуляції відпрацьованих газів, удосконалені корпуси суден і альтернативні джерела енергії. Розглянуто переваги і недоліки цих технологій для українських суден, зокрема танкерів. Впровадження таких технологій може зменшити негативний екологічний вплив та забезпечити економічні вигоди, такі як зниження витрат на паливо та експлуатацію суден. Вказані початкові кроки для впровадження інновацій, що можуть стати основою для подальшого розвитку морської інфраструктури в Україні. Крім того, слід звернути увагу на важливість навчання персоналу для ефективної експлуатації новітніх технологій, що дозволить досягти максимальних результатів в їхньому впровадженні та забезпечить безпеку навколишнього середовища. Також не можна забувати про необхідність міжгалузевої співпраці для успішної реалізації таких проектів на національному рівні.*

Висновки. *Інноваційні технології, такі як двигуни з рециркуляцією відпрацьованих газів, удосконалені корпуси суден і альтернативні джерела енергії, значно знижують екологічний вплив транспортування вуглеводнів. Економічні вигоди ці технології також зменшують витрати на паливо та експлуатацію суден. Для впровадження необхідно адаптувати законодавство, розробити технічні стандарти та залучити інвестиції для початкових кроків. Перспективи розвитку технологій можуть сприяти розвитку морської інфраструктури в Україні та встановленню нових екологічних стандартів. Враховуючи поточні глобальні тенденції до зменшення викидів та сталого розвитку, Україна має всі можливості стати лідером у впровадженні екологічно чистих транспортних технологій, що надасть конкурентні переваги на міжнародному ринку перевезень.*

Ключові слова: *навколишнє середовище, транспортування вуглеводнів, судновий транспорт, альтернативні джерела енергії, екологічні технології, морська інфраструктура, зменшення викидів.*

Постановка проблеми. У суспільстві питання екологічної стійкості та зниження впливу промислових процесів на довкілля стають дедалі насущними. Одним із значних джерел забруднення є транспортування вуглеводнів, яке залишається ключовим компонентом для багатьох галузей промисловості, включаючи енергетику, хімію та паливну промисловість.

В Україні, як і в багатьох інших країнах, транспортування вуглеводнів супроводжується значним негативним впливом на довкілля. Високий рівень викидів та енергоспоживання транспортних засобів, що використовуються для цього процесу, робить серйозний внесок у формування негативного екологічного сліду країни.

На момент 2023 року, за кількістю викидів в атмосферу, серед країн світу Україна займає 107 місце, маючи середню концентрацію забруднюючих речовин 2,5, що в 1,7 раза вище за рекомендоване ВООЗ середньорічне значення якості повітря. На жаль, статистика не поділяє рівень викидів по секторах забруднення, що однозначно знадобилося б для поліпшення ситуації в цілому [1].

Стаття розглядає новітні технології для зменшення викидів і підвищення ефективності морського транспорту в Україні.

У джерелах [2; 3] Норвезька компанія Ulstein представила новий дизайн корпусу суден, що знижує витрати пального і викиди забруднюючих речовин. Порівнюються традиційні двигуни

з двигунами з системою рециркуляції вихлопних газів (EGR), що зменшує викиди NOx у джерелах [4; 5]. Літературі [6; 7] йдеться про огляд стратегій Міжнародної морської організації для досягнення нульових викидів парникових газів і посилення норм проектування суден. Також у [8] Міжнародні зусилля з регулювання викидів у морському секторі в Європі, Америці та Азії. Джерело [9] значення альтернативних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергія, [10] глобальні екологічні проблеми транспорту і необхідність впровадження рішень для зменшення викидів. А у літературі [11] було розглянуто системи очищення вихлопних газів (SOx scrubbers) для відповідності екологічним стандартам і покращення якості повітря.

Розглянуті в джерелах інноваційні технології використовуються переважно в країнах Європи, Америки та Азії. Таким чином, виявлення, аналіз та практичне застосування цих технологій в майбутньому можуть стати базою для подальшого розвитку морської української інфраструктури. Оскільки вони сприятимуть не тільки зменшенню екологічного впливу від роботи суден, а й дозволять отримати потенційні економічні вигоди, такі як зниження витрат на паливо та експлуатацію суден.

Постановка завдання. У сучасних умовах зростаючих екологічних вимог і глобальних зусиль по зменшенню забруднення навколишнього середовища, питання ефективного скорочення негативного впливу морського транспортування вуглеводнів набуває особливої актуальності. В умовах жорсткої міжнародної екологічної регуляції, розробка та впровадження інноваційних технологій є ключовим чинником для досягнення сталого розвитку морської інфраструктури.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

– Оглянути і описати сучасні інноваційні технології для зменшення негативного впливу морського транспортування вуглеводнів на екологію.

– Аналізувати ефективність впровадження цих технологій у контексті зменшення викидів шкідливих речовин та економії пального.

– Оцінити переваги і недоліки кожної технології, включаючи економічну доцільність та технічну складність.

– Розробити рекомендації для українських морських перевізників і регуляторів щодо вибору і впровадження найбільш ефективних рішень.

Виклад основного матеріалу. В сучасних умовах господарювання, які характеризуються посиленням впливу на навколишнє середовище та збільшенням його забруднення, надзвичайно актуальним є питання впровадження нових підходів до виробничих процесів. Навантаження на довкілля відбувається на тлі посилення конкурентної боротьби за ринки збуту та залучення все більшої кількості природних ресурсів, що призводить до їх поступового виснаження. Вихід українських товаровиробників на зовнішні ринки супроводжується поглибленням відносин з міжнародними контрагентами, збільшенням кількості міжнародних транспортних перевезень та подальшим навантаженням на навколишнє середовище [11].

Забруднення довкілля є однією з найбільших проблем людства. За даними американського видання «Lancet», збільшення забруднення навколишнього середовища спричиняє більше жертв, ніж війни, насильство, хвороби, голод або стихійні лиха. Зокрема, згідно з дослідженнями, кожна шоста смерть на планеті викликана токсичним впливом на довкілля. Це лише приблизна оцінка, оскільки не всі країни ведуть екологічний моніторинг.

Таким чином, постає необхідність впровадження принципово нових підходів до ведення господарської діяльності, зокрема у сфері виробництва та реалізації продукції на засадах сталого розвитку. Одним з інноваційних інструментів, що може допомогти в цьому, є впровадження зеленої логістики. Цей підхід дозволяє зменшити навантаження на довкілля, знижувати витрати на логістичні операції та підвищувати прибутковість і конкурентоспроможність підприємства.

Згідно з останніми даними, рівень забруднення водних мас і викиди парникових газів від морського транспортування вуглеводнів є серйозною екологічною проблемою. Наприклад, дослідження за 2023 рік показали значні викиди забруднюючих речовин, які потребують термінового вирішення. Однак появу інноваційних транспортних технологій, таких як сучасні судна, альтернативні пального та розробка ефективніших методів управління логістикою, відкривають нові перспективи для скорочення негативного впливу на навколишнє середовище [10].

Проведено детальний аналіз можливих інноваційних транспортних рішень, спрямованих на зменшення екологічного сліду під час морського транспортування вуглеводнів в Україні.

Сучасні технології двигунів суден, оснащені системами рециркуляції вихлопних газів (EGR), можуть суттєво зменшити викиди шкідливих речовин. Зокрема, системи EGR дозволяють зменшити викиди оксидів азоту (NOx) на 50–60%. Принцип роботи EGR полягає в тому, що частина

вихлопних газів повертається до циліндрів двигуна, де змішується з паливом та повітрям, що знижує температуру згоряння і, як наслідок, зменшує утворення NOx [11].

Були виявленні такі переваги, як значне зменшення викидів NOx, покращення якості повітря. Недоліки, можливе збільшення витрат на обслуговування двигунів, необхідність адаптації до нових технологій.

Інноваційні конструкції корпусів суден, що дозволяють знизити опір води, ведуть до економії пального та зменшення викидів шкідливих речовин. Такі технології представлені в джерелах [2] та [3].

Перевага – зменшення витрат на паливо, зниження викидів CO2, підвищення ефективності перевезень. Недоліки – високі витрати на розробку та впровадження нових корпусів.

Судна, що використовують альтернативні джерела енергії, такі як стислий природний газ (СПГ) або водень, не виробляють шкідливих викидів в атмосферу. Це забезпечує значне зниження екологічного впливу. Переваги, нульові викиди шкідливих речовин, покращення екологічної ситуації в морських портах. Недоліки, висока вартість альтернативних видів пального, потреба в новій інфраструктурі для зберігання та заправки [11].

В умовах посилення екологічних вимог і збільшення міжнародних стандартів, інноваційні технології стають ключовими для зменшення негативного впливу морського транспорту на довкілля. В Україні, як і в інших країнах, важливо впроваджувати ці технології для покращення екологічної ситуації та відповідності міжнародним стандартам.

Системи рециркуляції вихлопних газів (EGR) є важливою частиною сучасних технологій, що дозволяють зменшити викиди оксидів азоту (NOx) до 50–60%. EGR працює шляхом повернення частини вихлопних газів до циліндрів двигуна, де вони змішуються з новим паливом та повітрям. Це знижує температуру згоряння, що в свою чергу зменшує утворення NOx. Однак, впровадження EGR може супроводжуватись підвищенням витрат на обслуговування двигунів і потребою в адаптації нових технологій. Оцінка ефективності EGR також може варіюватися в залежності від конкретних умов експлуатації та конструкції двигуна.

Інноваційні конструкції корпусів суден знижують опір води і, як наслідок, зменшують витрати пального і викиди забруднюючих речовин. Такі технології включають покращення аеродинамічних характеристик корпусів, що дозволяє знижувати споживання пального та зменшувати викиди CO2. Основні переваги таких конструкцій – зменшення витрат на паливо та підвищення ефективності перевезень. Проте, розробка та впровадження нових корпусів суден потребують значних фінансових вкладень та часу на реалізацію [11].

Судна, що використовують альтернативні джерела енергії, такі як стислий природний газ (СПГ) або водень, демонструють нульові викиди шкідливих речовин. СПГ і водень є екологічно чистими видами пального, які суттєво зменшують вплив на атмосферу і покращують екологічну ситуацію в морських портах. Важливими перевагами є зменшення викидів CO2 та поліпшення якості повітря. Однак, висока вартість альтернативних видів пального і потреба в новій інфраструктурі для зберігання та заправки залишаються значними викликами для їх широкого впровадження.

Системи очищення вихлопних газів від SOx, або SOx scrubbers, є ефективним способом зменшення викидів оксидів сірки, особливо коли використовується паливо з високим вмістом сірки. SOx scrubbers очищують вихлопні гази, що дозволяє суднам відповідати стандартам SOx ECA навіть при використанні не відповідного пального. Переваги таких систем включають покращення якості повітря і відповідність міжнародним екологічним стандартам. Недоліками можуть бути високі витрати на установку і експлуатацію систем.

Впровадження нових методів управління логістикою, таких як оптимізація маршрутів, удосконалення систем моніторингу і контролю за викидами, також сприяє зменшенню екологічного впливу. Використання сучасних аналітичних інструментів і технологій може допомогти в зменшенні витрат на паливо та підвищенні загальної ефективності перевезень [8].

Альтернативні джерела енергії для суден пропонують ряд переваг, порівняно з традиційними джерелами енергії, такими як нафтове паливо. До цих переваг відносяться [6, 9]:

– альтернативні джерела енергії, такі як енергія вітру, сонця та водню, не виробляють викидів шкідливих речовин, таких як оксиди азоту (NOx), оксиди сірки (SOx) та тверді частинки. Саме ці викиди можуть завдати шкоди довкіллю і здоров'ю людини;

– нафтове паливо є основним джерелом енергії для суден. Однак запаси нафти обмежені і ціни на нафту можуть бути нестабільними. Альтернативні джерела енергії, такі як енергія вітру та сонця, не залежать від імпорту нафти;

– відновлювані джерела енергії, такі як енергія вітру та сонця, постійно відновлюються. Це озна-

чає, що вони можуть бути використані протягом тривалого часу без виснаження.

Однак альтернативні джерела енергії також мають ряд недоліків, які необхідно враховувати [9]:

– вартість палива для альтернативних джерел енергії може бути вищою, ніж вартість палива для традиційних джерел енергії. Наприклад, вартість електроенергії нині вища, ніж вартість нафтового палива;

– ефективність використання альтернативних джерел енергії може бути нижчою, ніж ефективність використання традиційних джерел енергії. Наприклад, двигуни внутрішнього згоряння на нафтовому паливі ефективніші, ніж електродвигуни;

– для використання альтернативних джерел енергії може знадобитися розвиток інфраструктури, такої як мережі електростанцій, станції заправки воднем тощо. Це може вимагати значних інвестицій.

Альтернативні джерела енергії для суден пропонують низку переваг, порівняно з традиційними джерелами енергії. Однак вони також мають низку недоліків, які необхідно враховувати. З розвитком технологій та інфраструктури альтернативні джерела енергії можуть стати привабливішим варіантом для суден.

Висновки. У сучасних умовах екологічної кризи і глобальних змін, впровадження інноваційних технологій у сфері морського транспорту є необхідним кроком для зменшення негативного впливу на довкілля. Технології зменшення викидів NOx, інноваційні конструкції корпусів суден, використання альтернативних джерел енергії, системи очищення SOx та нові методи управління логістикою – всі ці підходи можуть суттєво поліпшити екологічну ситуацію. В Україні впровадження таких технологій є важливим для досягнення відповідності міжнародним екологічним стандартам і забезпечення сталого розвитку морського транспорту.

Незважаючи на необхідність вкладень в інфраструктуру та навчання кадрів, компанії знаходять у перспективах розвитку зелених технологій додаткове стимулювання для впровадження змін у свої практики, створюючи цим сприятливе середовище для зменшення негативного впливу на навколишнє середовище.

Україна може з вигодою використовувати нові для себе технології у морському перевезенні, забезпечуючи екологічну стійкість та економічну ефективність. Розвиток інфраструктури та підтримка з боку держави можуть сприяти успішному впровадженню цих технологій.

Список літератури:

1. IQAir, швейцарська компанія-виробник систем очищення повітря, ВОЗ Всесвітня організація охорони здоров'я, 2023. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.iqair.com/ru/world-air-quality-report

2. Ulstein, businessnorway, Інноваційний дизайн корпуса Ulstein для більш економних суден, 2022 -1с. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://businessnorway.com/solutions/Ulstein-innovative-hull-design-for-more-fuel-efficient-vessels

3. Vu Minh Ngoc, Nguyen Thi Hai Ha, Pham Minh Ngoc, Dam Van Tung, Nguyen, Vietnam Maritime University, Conference Series Earth and Environmental Science, December 2023 – 3с. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/376463640_Numerical_Investigation_on_the_Influence_of_Ship_Hull_Form_Modification_on_Resistance_of_the_4600DWT_Cargo_Ship_Using_RANSE_Method

4. Elsayed Abdelhameed, Hiroshi Tashima, article belongs to the Special Issue Computational and Data-Driven Modeling of Combustion in Reciprocating Engines or Gas Turbines, EGR and Emulsified Fuel Combination Effects on the Combustion, Performance, and NOx Emissions in Marine Diesel Engines, 2022 – 2-6с. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.mdpi.com/1996-1073/16/1/336

5. Jie Shi, Yuanqing Zhu, College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, A Prompt Decarbonization Pathway for Shipping: Green Hydrogen, Ammonia, and Methanol Production and Utilization in Marine Engines, 2023 – 1с. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.mdpi.com/2073-4433/14/3/584

6. International Maritime Organization (IMO), In July 2023 (MEPC 80) IMO, IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships, 2023 – 1-5с. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.imo.org/en/OurWork/ Environment/Pages/2023-IMO-Strategy-on-Reduction-of-GHG-Emissions-from-Ships.aspx

7. International Maritime Organization (IMO), RESOLUTION MEPC.377(80), 2023 IMO STRATEGY ON REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS, 2023 – 1-2с. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://wwwcdn.imo.org/ localresources/en/OurWork/Environment/Documents/annex/MEPC%2080/Annex%2015.pdf

8. CHILLI.PEPPER, Альтернативні види палива для судноплавства, 2020 – 2-6с. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://newssky.com.ua/alternativnye-vidy-topliva-dlya-sudohodstva/

9. Mingyang Huang, Wei He, Atilla Incecik, Andrzej Cichon, Grzegorz Królczy, Zhixiong, Journal of Energy Storage, Renewable Energy Storage and Sustainable Design of Hybrid Energy Powered Ships: A, 2021- 3-6c. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/355062381_Renewable_energy_storage_and_sustainable_design_of_hybrid_energy_powered_ships_A_case_study

10. United Nations, Economic Commission for Europe Inland Transport Committee, ECE/TRANS/WP.5/2022/5, Accelerating the inland transport sector`s climate change mitigation measures, 2022 – 6c. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://unece.org/sites/default/files/2022-08/ECE-TRANS-WP5-2022-05r.pdf

11. MAN Energy Solutions. (2024). *AN B&W Two-stroke Marine Engines Emission Project Guide for Marpol Annex VI Regulations* (14th ed.). Retrieved from www.marine.man-es.com

Lugovoy T.A., Kravchenko O.A. OVERVIEW OF THE NEWEST INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR UKRAINE TO REDUCE THE NEGATIVE IMPACT ON THE ENVIRONMENT DURING SEA TRANSPORTATION OF HYDROCARBONS

Introduction*: This article examines the latest technologies aimed at reducing the environmental impact of hydrocarbon transportation in Ukraine. It provides a review and comparison of existing and innovative transport solutions that can significantly reduce the ecological footprint. Key factors affecting the environment during hydrocarbon transportation by sea are identified.*

Objective: *The objective of this article is to identify modern technologies for reducing the environmental impact of hydrocarbon transportation. This includes both technical aspects and considerations for changing strategies and policies in the energy and transport sectors. Three key innovative technologies are outlined: engines with exhaust gas recirculation systems, advanced ship hull designs, and alternative energy sources. The advantages and disadvantages of these technologies for Ukrainian vessels, particularly tankers, are examined. Implementing such technologies can reduce negative environmental impacts and provide economic benefits, such as reduced fuel and operational costs. Initial steps for implementing innovations are suggested, which may serve as a foundation for further development of maritime infrastructure in Ukraine. In addition, attention should be paid to the importance of training personnel for the effective operation of the latest technologies, which will allow achieving maximum results in their implementation and ensuring environmental safety. We should also not forget the need for inter-sectoral cooperation for the successful implementation of such projects at the national level.*

Conclusions: *Innovative technologies, such as engines with exhaust gas recirculation systems, advanced ship hull designs, and alternative energy sources, significantly reduce the environmental impact of hydrocarbon transportation. These technologies also offer economic benefits by decreasing fuel and operational costs. Implementation requires adapting legislation, developing technical standards, and attracting investment for initial steps. The potential for technology development may contribute to the advancement of maritime infrastructure in Ukraine and the establishment of new environmental standards. Given the current global trends towards emission reduction and sustainable development, Ukraine has every opportunity to become a leader in the implementation of environmentally friendly transport technologies, which will provide competitive advantages in the international transportation market.*

Key words: *environment, hydrocarbon transportation, maritime transport, alternative energy sources, ecological technologies, maritime infrastructure, emission reduction.*

УДК 629.3.014.7+629.3.022.4
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/40

Петров Л.М.
Військова академія (м. Одеса)

Кішянус І.В.
Військова академія (м. Одеса)

Борисенко Т.М.
ТОВ «Агенство продажу активів»

Могилянець Т.М.
Військова академія (м. Одеса)

Малиновський О.А.
Військова академія (м. Одеса)

Шелухін С.В.
Військова академія (м. Одеса)

Нікішин В.А.
Військова академія (м. Одеса)

ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ХОДОВОЇ ЧАСТИНИ АВТОМОБІЛЯ З ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ МІЖ ВЕДУЧИМИ МОСТАМИ

В статті авторів Петрова Л.М., Кішянуса І.В., Борисенко Т.М., Лисий О.В., Верпівського С.М., Малиновського О.А., Шелухніна С.В., Нікішина В.А. Дослідження конструкції ходової частини автомобіля з перетворювачем енергії між ведучими мостами приведені умови для приводу колісних рушіїв за допомогою ланцюгової передачі, в якому одночасно в робочому процесі його кочення на кінетичну енергію накладається потенційна. Математична модель одночасного поєднання ланцюговою передачею колісних рушіїв вантажного автомобіля, яка заснована на теорії передачі енергії в коливальному русі автомобільної системи показала та виявила зону найбільш ефективної роботи кочення колісного рушія за допомогою обертального руху підпружиненого ланцюга.

Наукова та практична значимість роботи полягає в тому, що вперше запропонований вантажний автомобіль з приводом колісних рушіїв ланцюговою передачею з теоретичною розробкою такого приводу в якої застосована теорія коливального руху з пружним регулюванням та накопиченням енергії для підвищенної прохідності, в якій при обертанні коліс введена технологія для накопичення енергії в зоні плями контакту з опорною поверхнею.

Методологією дослідження являлося встановити математичний зв'язок між прискоренням рухливого пружного накопичувача енергії та кутів нахилу ланцюга при обертанні осі відносно плями контакту та тягового зусилля від тих же кутів.

Результатом є розроблена геометрія ланцюгового приводу колісних рушіїв вантажного автомобіля для виконання бойових завдань з рухливим пружним накопичувачем енергії для здійсннння роботи, що відповідає руху ходовим колесам між другим і третім ведучими мостами.

Цінність проведеного дослідження, результати проведеної роботи дозволять зробити внесок в галузь автомобільної промисловості для виконання бойових завдань .

Запропоновано вантажний автомобіль для підвищення прохідності, динамічності, зменшення витрати палива, що є актуальним на сьогоднішній день.

Ключові слова: *ходове колесо, вільна вісь, рухливий пружний накопичувач, фізико-математична модель, колісний рушій, лагнцюгова передача, ролик.*

Постановка проблеми. Удосконалення конструкції ходової частини вантажного автомобіля (зокрема військових автомобілів) формувалася і розвивалася в результаті діяльності наукових організацій і учених країн світу. Для військових вантажних автомобілів обов'язковою умовою є створення їх ходової системи для безумовної відповідністї її конструкції для виконання поставлених завдань. Зміна конструкції і ходових властивостей автомобілів повинно забезпечувати перевезення військових вантажів і особового складу з максимальною безпекою при найменших експлуатаційних витратах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нами проведено аналіз розподілу обертів між ведучими колесами автомобіля за декілька десятиліть до сучасного стану удосконалення конструкції передачі обертів на ведучі колеса. Це представлено на (рис. 1, 2, 3).

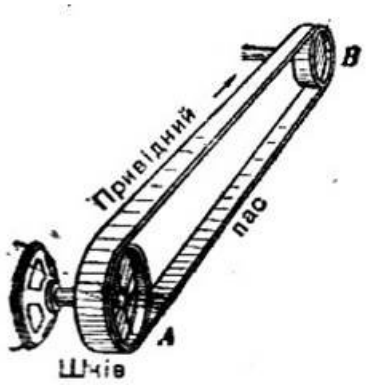


Рис. 1. Пасова передача

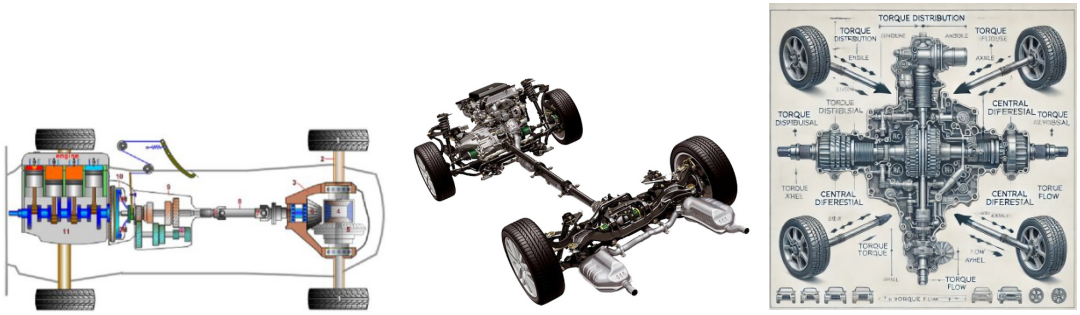
При пасовій передачі два колеса-шківи, закріплені на різних валах, охоплюються «безконечним (замкненим, коловим)» привідним пасом. Шків А на валу двигуна називається ведучим, а шків В на валу механізму – веденим. Якщо діаметри шківів не однакові то їх кутові швидкості (число обертів) будуть різні (оскільки лінійні швидкості повинні бути однакові – пас не «пробуксовує»).

Крутний момент у трансмісії автомобіля розподіляється між ведучими мостами для забезпечення максимальної ефективності та керованості автомобіля. Цей процес залежить від конструкції трансмісії, типу диференціалів і умов експлуатації (наприклад, на асфальті, бездоріжжі або в умовах слизької поверхні) (на рис. 2, а, б, в).

Адаптивна система розподілу представлена на (рис. 3). При адаптивній системі розподілу збільшується зчеплення на складних поверхнях, підвищується керованість на слизьких дорогах, покращується прохідність на бездоріжжі. У деяких конструкціях (AWD або 4WD) використовуються системи, що змінюють розподіл моменту залежно від умов: збільшується момент передачі на вісь, яка має кращий контакт із поверхнею. Використовуються електронно-керовані муфти або в'язкі диференціали.

На (рис. 4) представлена електронно-керована система розподілу Використовують датчики для визначення умов руху (ковзання коліс, швидкість, нахил дороги) та адаптують розподіл моменту. Системи Haldex, Torque-on-Demand.

У найпоширенішій конструкції на (рис. 5) пасова передача складається з ведучого (a) і веденого (b) шківів та замкнутої форми приводного паса (c, d), що розміщується на шківах із деяким попереднім натягом. Вільна ділянка (c) паса, що набігає на ведучий шків (a), називається ведучою гілкою паса, а вільна ділянка (d), що набігає на ведений шків, називається веденою гілкою. Попередній натяг паса створюється за рахунок його пружного розтягу при закладенні на шківи або застосуванням спеціального натяжного пристрою (ролика) (e). Під час роботи передачі пас передає енергію від ведучого шківа до веденого за рахунок сил тертя, які виникають між пасом та шківами.



а б в

Рис. 2. Розподіл крутного моменту між ведучими мостами
а – асфальт, б – бездоріжжя, в – слизька поверхня

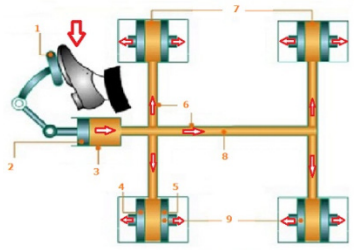


Рис. 3. Адаптивна система розподілу

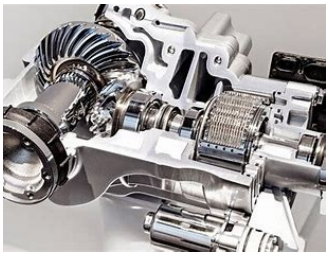


Рис. 4. Електронно-керована система розподілу

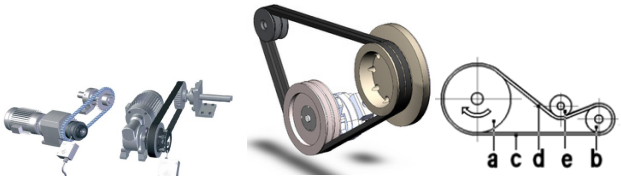


Рис. 5. Найпоширеніша конструкція пасової передачі

На (рис. 6) представлена багатошківна ланцюгова передача з натяжним роликом.

Рис. 6. Багатошківна ланцюгова передача з натяжним роликом для ходової системи автомобіля

Переваги: можливість використання при значних відстанях між валами, достатньо високий ККД, можливість передавання обертового руху одним ланцюгом декільком валам, у тому числі і з протилежним напрямом обертання.

Недоліки: збільшення довжини ланцюга через зношення шарнірних зєднань і відповідне послаблення руху ланцюга, нерівномірність руху ланцюга і повязані з цим динамічні явища у передачі та підвищений шум, низька кінематична точність при реверсуванні, потреба застосування додаткових пристроїв для регулювання натягу ланцюга.

Постановка завдання. В статті проведені теоретичні дослідження щодо підвищення експлуатаційних властивостей ходової частини вантажного автомобіля та отримані деякі результати, які характеризують можливість ефективного використання автомобіля в певних умовах і дозволяють оцінити, якою мірою його конструкція відповідає цим умовам.

Отримані результати з теорії розподілу зусилля між ведучими мостами вантажного автомобіля може знадобитися при проектуванні нових моделей, а також при виборі типів автомобілів з ходовою частиною відповідно до різних умов експлуатації.

Реалізація досліджень на практиці може дати можливість підвищити спроможність використовувати автомобіль за призначенням. Для цього слід збільшити середню прискорення руху (тим самим динамічність його руху) й зменшити витрату палива при одночасному збереженні безпеки руху й забезпеченні зручностей для водія й особового складу.

В статті дослідження автомобіля з перетворювачем енергії між ведучими мостами експлуатаційні властивості (ходової частини автомобіля), безпосередньо пов'язані з рухом автомобіля. До них віднесено прискорення розподілу крутного моменту між ведучими мостами та отримання підвищення тягових можливостей.

Рис. 7. Графік залежності прискорення автомобіля від значень кутів α, β

На (рис. 7) представлений графік залежності прискорення автомобіля від значень кутів α, β. На графіку виявлено менш динамічний вплив на колісні рушії зміна кутів від 5^0 до 60^0.

Виклад основного матеріалу. За основу розробки конструкції ходової частини автомобіля з перетворювачем енергії між ведучими мостами взяті елементи теорії [5].

Регулюючі ролики А та В рухаються поступально. Допустимо, що регулюючий ролик А переміщується з прискоренням $\bar{a}_A$. Так як регулюючі ролики зв'язані гумо-металевим ланцюгом і тому регулюючий ролик В буде підійматися з прискоренням $\bar{a}_B$, котре за модулем дорівнює прискоренню $\bar{a}_A$:

$$\bar{a}_A = \bar{a}_B = a$$

На (рис. 1) приведена схема зовнішніх сил і сил інерції, які діють на регулюючі ролики А та В: сили ваги $\bar{P}_1$, $\bar{P}_2$; нормальні реакції гумо-металевого ланцюга $\bar{N}_A, \bar{N}_B$; сили тертя $\bar{F}_A^{mp}$, $\bar{F}_B^{mp}$; зусилля в гумо-металевому ланцюзі $\bar{T}_A$, $\bar{T}_B$ ($\bar{T}_A = \bar{T}_B = T$) та сили інерції, які при поступальному русі регулюючих роликів прикладені у центрі їх мас і дорівнюють;

$$F_A^{in} = P_1 \cdot \frac{a}{g}; \quad F_B^{in} = P_2 \cdot \frac{a}{g}$$

І які направлені протилежно прискоренню центра мас регулюючих роликів А та В.

Система координат для регулюючого ролика А буде $O_{X1}Y_1$, а для регулюючого ролика В – $O_{X2}Y_2$ [3, 4].

На (рис. 8) представлена фізична модель ходової частини автомобіля з перетворювачем енергії між ведучими мостами [1, 2].

Рівняння кінетостатики для руху регулюючих роликів набувають вигляду:

Для регулюючого ролика А

$$\sum F_{kx} - P_1 \sin\alpha - F_A^{mp} - F_B^{in} + T = 0, \qquad (1)$$

$$\sum F_{ky} = N_A - P_1 cos \propto = 0; \qquad (2)$$

Для регулюючого ролика В

$$\sum F_{kx} = P_2 sin\beta + F_B^{mp} + F_B^{in} + T = 0, \qquad (3)$$

$$\sum F_{ky} = N_B - P_2 cos\beta = 0 \qquad (4)$$

З рівняння (2) та (4) знайдемо нормальні реакції

$$N_A = P_1 cos \propto,$$

$$N_B = P_2 cos\beta.$$

Знаходимо сили тертя:

$$F_A^{mp} = fN_A = f \cdot P_1 \cdot cos\alpha,$$

$$F_B^{mp} = fN_B = f \cdot P_2 \cdot cos\beta,$$

де f – коефіцієнт тертя ковзання.

Підставимо знайдені значення сил тертя та сил інерції в (1) та (3) рівняннях і отримуємо,

$$\frac{P_{1a}}{g} + T = P_1 \sin \propto - fP_1 cos \propto = P_1 (sin \propto - fcos \propto); \qquad (5)$$

$$T - \frac{P_{2a}}{g} = P_2 sin\beta + fP_2 \cos\beta = P_2 (sin\beta - fcos\beta) \qquad (6)$$

З рівняння (5) та (6) отримуємо формулу прискорення з яким рухається регулюючий ролик А та В та зусилля натягу в гумо-металевому ланцюзі:

$$a = \frac{P_1 (sin\alpha - fcos\alpha) - P_2 (sin\beta + fcos\beta) \cdot g}{P_1 + P_2}$$

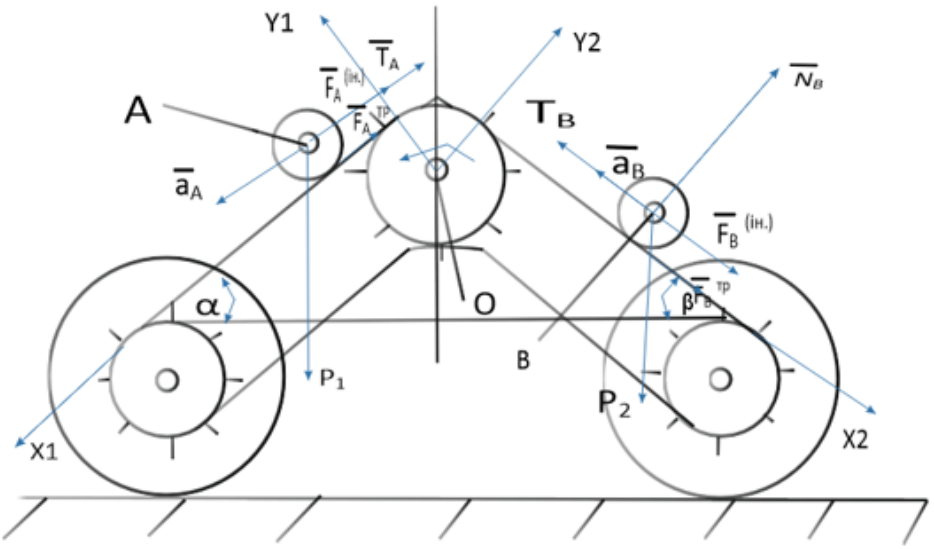


Рис. 8. Схема зовнішніх сил і сил інерції, які діють на регулюючі ролики А та В

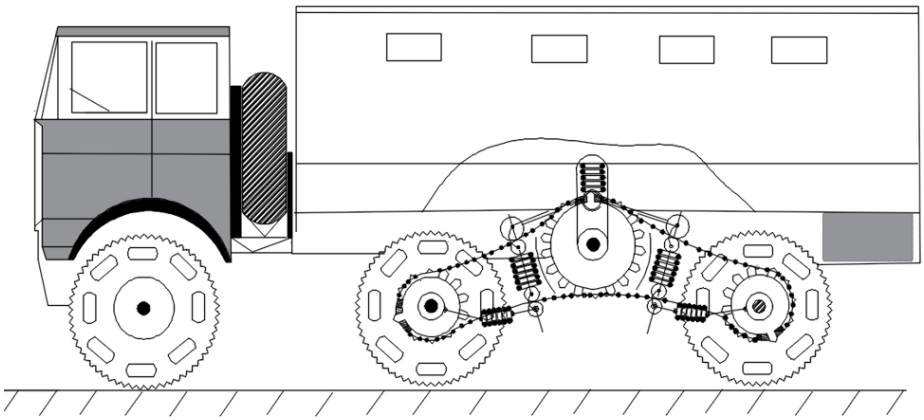


Рис. 9. Компонування військового вантажного автомобіля з ходовою частиною з перетворювачем енергії міжведучими мостами

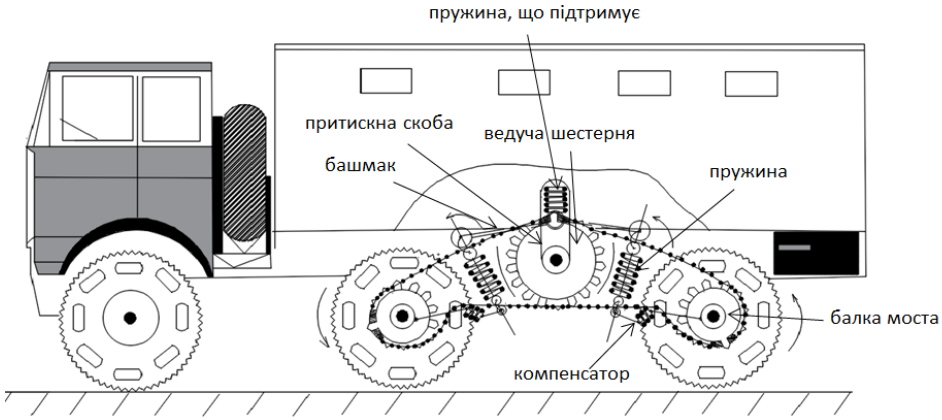


Рис. 10. Компонування військового вантажного автомобіля з ходовою частиною з перетворювачем енергії міжведучими мостами в робочому стані

$$T = \frac{P_1 \blacklozenge P_2 \left[sin\alpha + sin\beta - f\,(cos\alpha - cos\beta) \right]}{P_1 + P_2} =$$

$$= \frac{2P_1P_2}{P_1 + P_2} sin\frac{\alpha + \beta}{2}\left(cos\frac{\alpha - \beta}{2} + fsin\frac{\alpha - \beta}{2} \right).$$

На (рис. 9) показана компонування військового вантажного автомобіля з ходовою частиною з перетворювачем енергії міжведучими мостами.

На (рис. 10) показана компонування військового вантажного автомобіля з ходовою частиною з перетворювачем енергії міжведучими мостами в робочому стані.

Висновки.

1. При проведенні математичних розрахунків було складено рівняння кінетостатики для руху регулюючих роликів:

2. При проведенні розрахунків рівняння кінетостатики для руху регулюючих роликів було отримано формули прискорення з яким рухається регулюючий ролик А та В та зусилля натягу в гумо-металевому ланцюзі:

3. При проведенні розрахунку в середовищу EXSEL було виявлено робочу зону ходової частини автомобіля з перетворювачем енергії між ведучими мостами.

Список літератури:

1. Петров Л.М. « Спосіб удосконалення обертального руху колісного приводу автомобіля. Київ: Патент № 42929, Бюл. № 7, 2009, 1–3 с.

2. Петров Л. М. «Спосіб переміщення мобільного енергетичного засобу» Київ: Патент № 96475, Бюл. № 1, 2014, 1–3 с.

3. Колпахчян П.Г., Заріфян А.А. «Дослідження режимів роботи асинхронного тягового приводу методом комп'ютерного моделювання» Постановка задачі та комп'ютерна модель. «Транспортні проблеми». Міжнародно-технічна конференція, Харків:10, 2015, с. 125–136.

4. Молодан А.О. «Метод визначення додаткових витрат енергії викликаних нерівномірністю крутного моменту руху при відключенні циліндрів». Вісник машинобудування та транспорту: Харків: № 2, 2018, с. 85–94.

5. Петров Л. М., Петрик Ю. М. «Елементи теорії Л. Петрова для колісного рушія з розширеним тяговим зусиллям». Військова академія (м. Одеса): Збірник наукових праць № 2 (20) 2023, с. 155–161.

Petrov L.M., Kishianus I.V., Borysenko T.M., Mohylianets T.M., Malynovskyi O.A., Shelukhin S.V., Nikishyn V.A. STUDY OF THE DESIGN OF THE CAR CHASSIS WITH AN ENERGY CONVERTER BETWEEN THE DRIVE AXLES

In the article by the authors Petrov L.M., Kishyanus I.V., Borysenko T.M., Lysyi O.V., Verpovsky S.M., Malinovsky O.A., Shelukhnin S.V., Nikishina V.A. Study of the design of the chassis of a car with an energy converter between the drive axles The conditions for driving the wheels of the propulsion by means of a chain drive are given, in which simultaneously in the working process of its rolling the kinetic energy is superimposed on the kinetic energy. A mathematical model of the simultaneous combination of wheel drives of a truck by a chain drive, which is based on the theory of energy transfer in the oscillatory motion of an automobile system, showed and revealed the zone of the most effective operation of the rolling of the wheel drive by means of the rotational movement of a spring-loaded chain.

The scientific and practical significance of the work lies in the fact that for the first time a truck with a wheel drive by a chain drive was proposed with the theoretical development of such a drive, in which the theory of oscillatory motion with elastic regulation and energy accumulation for increased cross-country ability was applied, in which, when the wheels rotate, technology was introduced to accumulate energy in the area of the contact patch with the supporting surface.

The methodology of the study was to establish a mathematical relationship between the acceleration of a movable elastic energy storage device and the angles of inclination of the chain during the rotation of the axis relative to the contact patch and the traction force from the same angles.

The result is the developed geometry of the chain drive of the truck wheel drives for combat missions with a movable elastic energy storage to carry out work corresponding to the movement of the running wheels between the second and third drive axles.

The value of the study, the results of the work carried out will make it possible to contribute to the automotive industry for the performance of combat missions.

A truck has been proposed to increase cross-country ability, dynamism, and reduce fuel consumption, which is relevant today.

Key words: *running wheel, free axle, movable elastic accumulator, physical and mathematical model, wheel propulsion, lag gear, roller.*

УДК 625.767
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/41

Фоменко Г.Р.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ВЕЛОТРАНСПОРТ І ЙОГО РОЗВИТОК У НАСЕЛЕНИХ ПУНКТАХ

У післявоєнний період значна увага має приділятися відновленню транспортної інфраструктури у містах. Міста повинні ставати краще, зручніше для життя населення. Особливу увагу необхідно звернути на рух велосипедного транспорту і розвиток велосипедної інфраструктури. Необхідно відмітити, що велосипедний транспорт є надзвичайно популярним транспортом у країнах всього світу. В нашій країні тільки починається розвиток велокультури та розбудови велотранспорту та велоінфраструктури. У 2020 році почато розробку Національної велосипедної стратегії в Україні. Розробка і реалізація стратегії стане частиною українського внеску в Європейський план. Відомо, що понад 30 українських міст розробили стратегічні документи, які спрямовані на розвиток велосипедної інфраструктури.

Забезпечення високого рівня і якості життя населення – одна із пріоритетних задач країни, яка знаходить своє відображення в розвитку соціальної, транспортної інфраструктури міст та інших населених пунктів особливо у післявоєнний період. Дуже важливою є транспортна інфраструктура від розвитку і стану якої значно залежить процес економічного розвитку. Проблема модернізації транспортної інфраструктури у країні є актуальною. Висока капіталомісткість і масштабність інфраструктурних проектів потребує значних інвестицій. Важливим є залучення іноземних інвестицій, а також приватного бізнесу. Інвестування коштів у транспортну інфраструктуру дає можливості по створенню додаткових робочих місць, а це спрямоване на вирішення частки соціальних питань і може вплинути на розвиток конкуренції у галузі. Велосипедний транспорт є частиною транспортної, містобудівної, екологічної політики, а також політики в області охорони здоров'я та туризму. Він може бути частиною і доповненням громадського транспорту, який забезпечить мобільність населення. У багатьох розвинутих країнах велосипедний транспорт розвивається іноді більш швидкими темпами, в порівнянні з автомобільним, а кількість велопоїздок безперервно зростає. Найбільшу популярність велосипеди отримали у країнах Північної і Західної Європи, а також у США та Канаді. По кількості велосипедів і розвинутості об'єктів велосипедної інфраструктури лідирують Нідерланди і Данія. Для ефективного використання велосипедного транспорту організація парковки і зберігання також важлива, як і велосипедної інфраструктури. Організація парковки велосипедів може бути включена у загальноміську парковочну політику, при плануванні і проектуванні вулиць, районів, окремих комплексів будов подібно до того, як передбачається планування парковочних автомобілів.

Комплексний розвиток велосипедної інфраструктури може бути ефективним інвестиційним вкладом в інфраструктуру, здатний генерувати економічний ефект, як основу для подальшого розвитку міста.

Ключові слова: *транспорт, навколишнє середовище, велосипедна інфраструктура, планування міст.*

Постанова проблеми. Життя сучасного міста включає безліч факторів, одним із яких є транспортна система. Для забезпечення надійного і швидкого переміщення важливою є злагоджена робота інфраструктури. У післявоєнний період значна увага має приділятися відновленню транспортної інфраструктури у містах. Міста повинні ставати краще, зручніше для життя населення. Особливу увагу необхідно звернути на рух велосипедного транспорту і розвиток велосипедної інфраструктури.

Велосипед – це транспортний засіб незламності, який має можливість рухатися навіть по зруйнованим територіям міст. Крім того, велосипед дає можливість і індивідуальну свободу переміщення, яку можуть дозволити собі майже всі, незалежно від ступеня доходів і віку.

Необхідно відмітити, що велосипедний транспорт є надзвичайно популярним транспортом у країнах всього світу. В нашій країні тільки починається розвиток велокультури та розбудови велотранспорту та велоінфраструктури [1].

У 2020 році почато розробку Національної велосипедної стратегії в Україні. Розробка і реалізація стратегії стане частиною українського внеску в Європейський план. Ця концепція установить цілі та заходи розвитку велосипедного транспорту на рівні країни. Стратегія сприятиме координації транспортної політики в Україні.

Відомо, що понад 30 українських міст розробили стратегічні документи, які спрямовані на розвиток велосипедної інфраструктури.

У жовтні 2023 року Єврокомісія прийняла Європейську декларацію, якою велосипед визнано одним і найбільш стійких, доступних та інклюзивних, недорогих і здорових видів транспорту для Європейського суспільства та економіки. Це спрямоване на покращення велосипедного руху в Європі, хоча він й так один із найкращих у світі.

В Україні важливим є розвиток велоінфраструктури та інтеграція велосипеда з громадським транспортом. Це дозволить подолання тієї чи іншої відстані не на автомобілі, а на велосипеді, що буде сприяти зменшенню кількості автомобілів, як у транспортних потоках, так і припаркованих, покращенню стану навколишнього середовища. Велосипедний транспорт сприяє також покращенню фізичного стану людей [2]. Треба звернути увагу і на розвиток використання велосипедного транспорту у туризмі і привабливості нашої країни.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання розвитку транспортної інфраструктури спрямовані на покращення умов і якості життя у населених пунктах. Важливою складовою є впровадження екологічних видів транспорту до яких належить велосипедний транспорт. Використання велосипедного транспорту і формування велосипедної інфраструктури може частково зменшити кількість автомобілів на території міст, що буде сприяти покращенню стану навколишнього середовища. Питання розвитку велосипедного транспорту, планування і проектування велосипедної інфраструктури присвячено дослідження і роботи багатьох вчених, а саме: Bassett Д., Гел Й., Handy S., Blond K., Barnes G., Скорик Л., Горбачова П.Ф., Литвиненко Т.П., Гасенко Л.В. та ін [2–8].

Постановка завдання. Метою статті є розгляд питань поширення використання велосипедного транспорту та розвитку велосипедної інфраструктури для покращення умов життя населення у містах.

Виклад основного матеріалу. Забезпечення високого рівня і якості життя населення – одна із пріоритетних задач країни, яка знаходить своє відображення в розвитку соціальної, транспортної інфраструктури міст та інших населених пунктів особливо у післявоєнний період.

Важливою умовою підвищення рівня і якості життя населення є високий рівень розвитку, ефективність функціонування і доступність об'єктів соціальної і транспортної інфраструктури. До основних показників комфортності життя в сучасному місті можна віднести:

– природне середовище, геологічну будову і рельєф, мікроклімат, ландшафт і ґрунтовий покрив;

– екологічне середовище, рівень забруднення грунтів, рівень забруднення повітря, рівень забруднення води;

– соціальне середовище, забезпеченість об'єктами сфери послуг, забезпеченість транспортом;

– щільність і структура забудови та чисельність населення;

– благоустрій міського середовища, рівень елементів благоустрою, транспортна інфраструктура, озеленення;

– розвиток містобудування, економічний стан [9, 10].

Дуже важливою є транспортна інфраструктура від розвитку і стану якої значно залежить процес економічного розвитку.

У післявоєнний період міста вимагають значного відновлення та великої забудови. В той же час неминуче зростання кількості автомобілів, що потребує також значного розвитку транспортної інфраструктури.

Зростання кількості автомобілів супроводжується негативними факторами, а саме:

– погіршення екологічного стану внаслідок забруднюючих викидів вихлопних газів;

– зростання кількості автомобілів створює підвищений шумовий фон у містах, що негативно впливає на стан здоров'я населення;

– великі витрати часу жителів на переміщення із дому до місць роботи або навчання;

– велика кількість аварійних ситуацій та дорожньо-транспортних пригод;

– зростання міст потребує розвитку транспортної інфраструктури, а особливо потребує відновлення та розвитку вулично-дорожньої мережі.

Проблема модернізації транспортної інфраструктури у країні є актуальною. Висока капіталомісткість і масштабність інфраструктурних проектів потребує значних інвестицій. Важливим є залучення іноземних інвестицій, а також приватного бізнесу. Інвестування коштів у транспортну інфраструктуру дає можливості по створенню додаткових робочих місць, а це спрямоване на вирішення частки соціальних питань і може вплинути на розвиток конкуренції у галузі. Такі заходи можуть покращити економічний стан і сприяти економічному зростанню у регіоні.

Розвиток процесу інвестування для відновлення будівництва може дати змогу економічному

зростанню що буде сприяти покращенню якості життя у країні. Одним із способів покращення транспортної інфраструктури у містах може бути розвиток велосипедного транспорту і велоінфраструктури [2, 11].

Велосипедний транспорт є частиною транспортної, містобудівної, екологічної політики, а також політики в області охорони здоров'я та туризму. Він може бути частиною і доповненням громадського транспорту, який забезпечить мобільність населення. Світовий досвід свідчить, що для створення розгорнутої велоінфраструктури необхідно близько 10–15 років.

Формування мережі велосипедного транспорту має ряд переваг, таких як:

– зниження кількості шкідливих викидів у повітря міст;

– зниження рівня шуму;

– зниження автомобільних заторів;

– зниження потреби у парковочних місцях;

– покращення фізичної активності та стану здоров'я населення;

– зниження потреби палива для автомобілів;

– можливість більшого спілкування між людьми, а також вивчення нових місць і маршрутів, що буде збільшувати туристичну привабливість міст;

– більш висока мобільність велосипедного транспорту у порівнянні з автомобілем [8, 12–14].

У багатьох розвинутих країнах велосипедний транспорт розвивається іноді більш швидкими темпами, в порівнянні з автомобільним, а кількість велопоїздок безперервно зростає. Найбільшу популярність велосипеди отримали у країнах Північної і Західної Європи, а також у США та Канаді. По кількості велосипедів і розвинутості об'єктів велосипедної інфраструктури лідирують Нідерланди і Данія. У Нідерландах користуються велосипедним транспортом 39 % населення, 25 % – використовують для поїздок на роботу. Середня відстань поїздок на велосипеді складає 2,5 км за день. В Амстердамі в межах міста побудовано 400 км велодоріжок. Кожний житель володіє велосипедом, а деякі не одним. Велодоріжки відзначені спеціальними знаками, які неможливо не помітити, а активний велосипедний рух регулюється окремо.

У Данії велосипедним транспортом користується 35 % населення. За рік проїзд Данців складає біля 900 км на велосипедах.

У столиці Копенгагені побудовано 350 км велодоріжок, а велосипедів у п'ять разів більше ніж автомобілів. Сигнал світлофорів для велосипедистів включається трохи раніше, чим для інших учасників руху [3, 6, 15].

У більшості європейських країн, а також у США розвиток велосипедного транспорту уже тривалий час підлягає управлінню на рівні уряду. Приймаються до виконання численні плани і програми розвитку велосипедної інфраструктури, фінансування здійснюється із держбюджету. Як свідчить досвід європейських країн, популярність і розвиток велосипедного транспорту починається із громадських організацій на рівні міста, регіону, країни із подальшим підключенням до цього процесу державних структур і бізнесу, а також треба відмітити, у зв'язку із масовістю цей рух отримує законодавчу підтримку на всіх рівнях [1, 15].

Розвиток велосипедної інфраструктури може послужити поштовхом для розвитку міських територій і створити ємний попит на ринку послуг таких як: спорт-магазини, технічний сервіс, виробництво велосипедних комплектуючих.

Для ефективного використання велосипедного транспорту організація парковки і зберігання також важлива, як і велосипедної інфраструктури [8, 13].

Велопарковки необхідні для того, щоб можливо було отримати велосипед в оренду в місцях великого скупчення людей таких як, станції метрополітену, торгівельні центри, парки відпочинку, території житлових масивів. У житлових масивах іноді потрібна організація зберігання велосипедів. Така потреба у велосипедних парковках виникає у зв'язку з тим, що можлива крадіжка велосипеду, а також необхідності організації паркінгу для великої кількості велосипедів у міському просторі. Організація парковки велосипедів може бути включена у загальноміську парковочну політику, при плануванні і проектуванні вулиць, районів, окремих комплексів будов подібно до того, як передбачається планування парковочних автомобілів.

Існують парковки короткострокові і довгострокові. Для короткострокового зберігання найзручніше використовувати парковки із застосуванням пристосувань охорони. При довгостроковій парковці, коли велосипедисти залишають велосипед на декілька годин, або на весь день чи ніч, на перше місце за важливістю виходить критерій надійності зберігання. Довгострокова парковка важлива якщо велосипедисти використовують велосипеди у своїх щоденних поїздках на роботу, щоб доїхати до зупинки громадського транспорту або навпаки – від зупинки до кінцевого пункту призначення.

Дуже важливим є фактор, який негативно впливає на рівень володіння велосипедами, тобто відсутність умов зберігання велосипедів вдома або поряд із житловими будинками. В теперішній час, як у районах із старою забудовою, так і в новобудовах не передбачені місця для зберігання велосипедів. Внаслідок цього бажано при новому будівництві у будівельних нормах і правилах враховувати мінімальні цільові показники по забезпеченню можливостей для парковки і зберігання велосипедів.

Також можливе використання велостанцій. Велостанції, це вільна будова із загальною площею, яка може мати 36 м^2 і на ній розташована зона обслуговування клієнтів та склад для зберігання велосипедного обладнання в якому можна розмістити порядку 10 велосипедів і розмістити робоче місце обслуговуючого персоналу. Таку легку будівлю можна розташувати біля станцій метрополітену, на території торгівельних центрів, у житлових комплексах. Вкладені інвестиції можуть окупатися у таких станціях за рахунок надходжень від здавання велосипедів в оренду, зберігання, а також ремонту велосипедів. Якщо така велостанція буде перебувати у житлових комплексах, то вона може будуватися і обслуговуватися товариствами власників житла.

Для використання корисного потенціалу велосипедного транспорту необхідно, щоб велосипедна інфраструктура була привабливою і безпечною, а також дозволяла велосипедистам зручно і швидко дістатися до місця призначення [8, 16]. Крім того, щоб перейти від автомобіля до велосипеда у бажаємому обсязі, необхідно сформувати у суспільстві позитивне відношення до велосипедного транспорту, підняти його соціальний статус і престиж.

Висновки. Транспортна інфраструктура міст, як частина благоустрою і соціального середовища, має базуватися на принципах охорони навколишнього середовища і покращення умов для проживання населення.

Одним із шляхів вирішення транспортних і екологічних проблем у містах може стати частковий перехід від автомобільного транспорту до збільшення використання велосипедного транспорту. Світовий досвід свідчить про позитивні приклади реалізації проектів розвитку велосипедної інфраструктури, які формують не тільки соціальний ефект, а також стимулюють розвиток підприємництва у сферах супутніх розвитку велосипедного транспорту.

Благоустрій і соціальне середовище є одним і складових факторів комфортності проживання у містах, тому для їх зростання бажано, щоб були визначені шляхи подальшого розвитку міських інфраструктур і розроблені напрямки територіальної стратегії у програмах розвитку.

Комплексний розвиток велосипедної інфраструктури може бути ефективним інвестиційним вкладом в інфраструктуру, здатний генерувати економічний ефект, як основу для подальшого розвитку міста.

Список літератури:

1. Basbas S. Evaluation of a sustainable urban transport system through the use of the transecon methodoloqy. International jornal of sustainable Development and Planninq. 2009, 4 (1). P. 18-34.

2. Скорик Л., Пінчук В. Планування принципів організації велосипедної інфраструктури великих міст України на прикладі Києва. Вісник НПОМА. 2024. Т. 1. С. 36-40.

3. Bassett D. Active Transportation and Obesity in Europe, North America and Australia. ITE journal. 2011. Vol. 81/8. P. 24-28.

4. Гел Й. Міста для людей (переклад з анг. О. Любарської). Київ: Основа. 2018. 280 с.

5. Handy S. Promotinq Ciclinq for Transport: Researh Needs and Challenqes. Transport Reviews. 2014. Vol. 34. N. 1. P. 4-24.

6. Blond K. Prospective Study of Bicyclinq and Risk of Coronary Heart Disease in Danish Men and Women. Circulation. 2016. Vol. 134 (18). P. 1409-1411.

7. Barues G. Estimatinq bicyclinq demand. Transportation Ressarch Record: Journal of the Transportation Research Board. 2005. vol. 1939 (1). P. 45-51.

8. Горбачов П.Ф. Модель вибору маршруту велосипедного транспорту з метою мінімізації часу у дорозі. Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. 2013. № 61-62. С. 218-222.

9. Токмиленко Є.С. Планування велосипедної інфраструктури для забезпечення безпеки і комфорту руху. Матеріали 3-ї міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми підвищення рівня безпеки, комфорту і культури дорожнього руху». Харків, ХНАДУ. 2013. С. 196-197.

10. Бондаренко І. Комфортне місто. Як спланувати велосипедну інфраструктуру. Київ: Асоціація велосипедистів Києва. 2014. 64 с.

11. Gotschi, Garrard and Giles-Corti. Cyclinq as a part of daily life: Areview of health perspectives. Transport Reviews, 2016, 25 (1). P. 1-27.

12. Stinson M.A. Commuter bicyclist route choise: Analysis usinq a stated preference surkey. Transportation Research Record: jurnal of the Transportation Research Board. 2003. vol. 1828. P. 107-115.

13. Larsen J. The marinq of a pro-cyclinq city: Social practices and bicycle mobilities. Environment and Planninq A. 2017. vol. 49 N 4. P. 876-892.

14. Литвиненко Т.П., Смілянець Л.В. Закордонний досвід проектування шляхів руху індивідуальних екологічних транспортних засобів. Збірник наукових праць (Галузеве машинобудування, будівництво). Пом-НТУ. 2013. Вип. 4 (39). Т. 2. С. 132-141.

15. Гасенко Л.В. Порівняльний аналіз основних вимог, що висуваються до велосипедної інфраструктури в Україні та за кордоном. Наукові нотатки. Міжнародний збірник. Луцьк. ЛНТУ. 2014. Вип. 46. С. 98-105.

16. Heinen E., Van Wee B., Maat K. Commutinq by bicecle. An overview of the literature. Transport Reviews. 2009. 30 (1). P. 59-96.

Fomenko H.R. BICYCLE TRANSPORT AND ITS DEVELOPMENT IN URBAN CENTERS

In the post-war period, considerable attention should be paid to the restoration of transport infrastructure in cities. Cities should become better, more comfortable for the population. Particular attention should be paid to cycling and the development of cycling infrastructure. It should be noted that bicycle transport is extremely popular in countries around the world. In our country, the development of cycling culture and the development of cycling transport and cycling infrastructure is just beginning. In 2020, the development of the National Cycling Strategy in Ukraine began. The development and implementation of the strategy will be part of Ukraine's contribution to the European plan. It is known that more than 30 Ukrainian cities have developed strategic documents aimed at developing cycling infrastructure.

Ensuring a high standard of living and quality of life is one of the country's priorities, which is reflected in the development of social and transport infrastructure in cities and other settlements, especially in the post-war period. Transport infrastructure is very important, and its development and condition significantly affect the process of economic development. The problem of modernizing the country's transport infrastructure is urgent. The high capital intensity and scale of infrastructure projects requires significant investments. It is important to attract foreign investment and private business. Investing in transport infrastructure provides opportunities to create additional jobs, which is aimed at solving some social issues and can affect the development of competition in the industry. Cycling is a part of transport, urban planning, environmental, health and tourism policies. It can be part of and complementary to public transportation, which will ensure the mobility of the population. In many developed countries, bicycle transport is sometimes developing at a faster pace than automobile transport, and the number of bicycle trips is constantly growing. Bicycles are most popular in Northern and Western Europe, as well as in the United States and Canada. The Netherlands and Denmark are leaders in terms of the number of bicycles and the development of bicycle infrastructure. For the efficient use of bicycle transport, the organization of parking and storage is as important as bicycle infrastructure. The organization of bicycle parking can be included in the citywide parking policy, in the planning and design of streets, districts, and individual building complexes, similar to the planning of parking cars.

The integrated development of bicycle infrastructure can be an effective investment in infrastructure that can generate economic benefits as a basis for further development of the city.

Key words: *transportation, environment, bicycle infrastructure, urban planning.*

УДК 629.331:656 (Транспорт)
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/42

Хітров І.О.
Національний університет водного господарства та природокористування

ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ АВТОБУСІВ ДЛЯ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Електричний транспорт має довгу історію та значний прогрес, але йому ще належить пройти довгий шлях, перш ніж він буде повністю прийнятий як основний вид транспорту. А що, як електричні автобуси можуть стати тією суспільною технологією, яка допоможе нам зробити цей перехід? Останніми роками пасажирський транспорт та автомобільний світ зазнали впливу нових форм мобільності, пов'язаних з виходом на ринок електричної енергії. З точки зору мобільності, тенденція вказує на те, що в найближчому майбутньому ми всюди побачимо електричні автобуси. Вони розглядаються як екологічна альтернатива традиційному дизельному транспорту, що здатна забезпечити зменшення викидів парникових газів та шумового забруднення, а також підвищення якості транспортного обслуговування населення. На даний момент впровадження повної заборони на виробництво класичних пасажирських транспортних засобів є недоцільним з огляду на технічні, економічні та соціальні чинники. Оцінка існуючих технологій та виявлення перспективних інновацій можуть сприяти створенню більш ефективних та доступних електричних транспортних засобів. Необхідно забезпечити збалансований перехід до екологічно чистого транспорту, враховуючи потреби виробників, споживачів та держави. Транспортні компанії, які переходять на екологічно чисті види транспорту, будуть мотивовані не тільки перевагами скорочення викидів, але й значним зниженням експлуатаційних витрат, більш широкими суспільними перевагами та економічним добробутом. Стаття спрямована на висвітлення світових тенденції розвитку ринку електричних автобусів та їх застосування для організації пасажирських перевезень з подальшим цільовим аналізом транспортного забезпечення маршруту «Млинів-Дубно» та оцінкою доцільності застосовування таких транспортних засобів. Результати дослідження можуть бути корисними для прийняття рішень щодо впровадження екологічного транспорту на регіональних маршрутах та може слугувати базою для подальших наукових досліджень сталого розвитку.

Ключові слова: *пасажирські перевезення, внутрішньорайонне сполучення, електричний автобус, загальна будова, запас ходу.*

Постановка проблеми. Перехід на пасажирський транспорт з електроприводом покращує якість повітря, зменшує викиди та шумове забруднення, скорочує витрати та надає населенню більш комфортні та широкі послуги.

Стимул для відмови від дизельного палива виходить за рамки скорочення викидів. Протягом усього терміну експлуатації вартість електричного транспортного засобу є конкурентоспроможною зі звичайними автобусами, а ціновий паритет, як очікується, буде досягнутий до 2030 року.

Тому, застосування альтернативних транспортних засобів перевізниками при організації пасажирських внутрішньо районного сполучення з метою отримання соціально-економічної результативності і екологічності є досить актуальним і затребуваним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останнім часом питання використання електричних автобусів у сфері пасажирських перевезень набуло значної уваги в наукових колах. Серед ключових аспектів, які висвітлюються у публікаціях, виділяються екологічні переваги електротранспорту [1], економічна ефективність експлуатації [2], технічні характеристики сучасних електробусів та їх адаптація до різних маршрутів [3].

Практичні дослідження показують, що електричні автобуси можуть стати конкурентоспроможною альтернативою традиційному транспорту на середньо- та короткотривалих маршрутах. При цьому значну увагу приділяють соціально-економічним перевагам впровадження такого транспорту, включаючи підвищення якості послуг для пасажирів та зниження рівня шумового забруднення [4].

Постановка завдання. Метою статті є техніко-експлуатаційна оцінка перспективності застосування електричних автобусів для пасажирських перевезень внутрішнього районного сполучення за маршрутом «Млинів-Дубно» Рівненської області.

Виклад основного матеріалу. Електричний транспорт вважається частиною майбутнього, але

правда полягає в тому, що він був значною частиною історії транспорту і продовжують формувати спосіб пересування людей.

Світові виробники, як правило, не поспішають задовольняти зростаючий попит на автобуси з нульовим рівнем викидів, що призвело до появи кількох достатньо конкуруючих але менших виробників. Хоча більшість великих виробників планують збільшити частку продажів автобусів з нульовим рівнем викидів у наступному десятилітті, деякі з них зосереджують значні ресурси на технологіях, що працюють на природному газі.

Впровадження електричних автобусів зростає у всьому світі. Відправною точкою є Китай, і знадобилося лише кілька років, щоб інші країни почали перехід на цей вид транспорту. На сьогоднішній день приблизно 98% електробусів у світі експлуатуються в китайських містах [5]. Також спостерігається збільшення прогнозних показників збільшення частки автобусів з нульовим рівнем викидів серед Європейських країн (рис. 1).

Світовий ринок електробусів у 2027 році досягне понад 670 тис. одиниць (з 112 тис. у 2022 році), в якому прогнозується, що Північна Америка стане найбільш швидкозростаючим ринком для впровадження електричного транспорту [6].

За даними сайту Фокус «великі міста в Україні поступово переводитимуть на експлуатацію електробусів та з 2033 року до перевезення пасажирів допускатимуть виключно електричні моделі» [8]. У Львові підписано меморандум про закупівлю 250 електробусів, які впродовж трьох років має виготовити концерн «Електрон» і передбачається, що 200 електробусів закуплять приватні перевізники, а 50 – мерія міста [9].

Ізраїльський виконавчий директор CreamCol Gady Shlasky підкреслює переваги технічної сторони вибору електричних автобусів: витрати на технічне обслуговування приблизно на 25% нижчі, ніж витрати на обслуговування дизельного автобуса, оскільки електродвигун не потребує такого ж рівня обслуговування, як дизельний двигун; втрати енергії електричного двигуна значно нижчі, ніж втрати енергії дизельного двигуна, тому вартість кілометра пробігу електробуса становить приблизно третину від вартості поїздки на дизельному автобусі; електробус працює набагато тихіше, ніж дизельний, що робить поїздку приємнішою для пасажирів і значно знижує рівень шуму в навколишньому середовищі; електробуси оснащені рекуперативною гальмівною системою, яка виробляє електроенергію під час гальмування [10].

Проаналізуємо розвиток пасажирських перевезень внутрішнього районного сполучення «Млинів-Дубно» та його транспортного забезпечення. Починаючи з 2016 року селище міського типу Млинів є центром Млинівської селищної громади Дубенського району Рівненської області. Млинівська об'єднана територіальна громада одна з найбільших на Рівненщині, до складу громади входять райцентр Млинів і 11 округів, що налічує 42 населені пункти.

Селище Млинів розвивається багатогранно. Важливим об'єктом інфраструктури для мобіль-

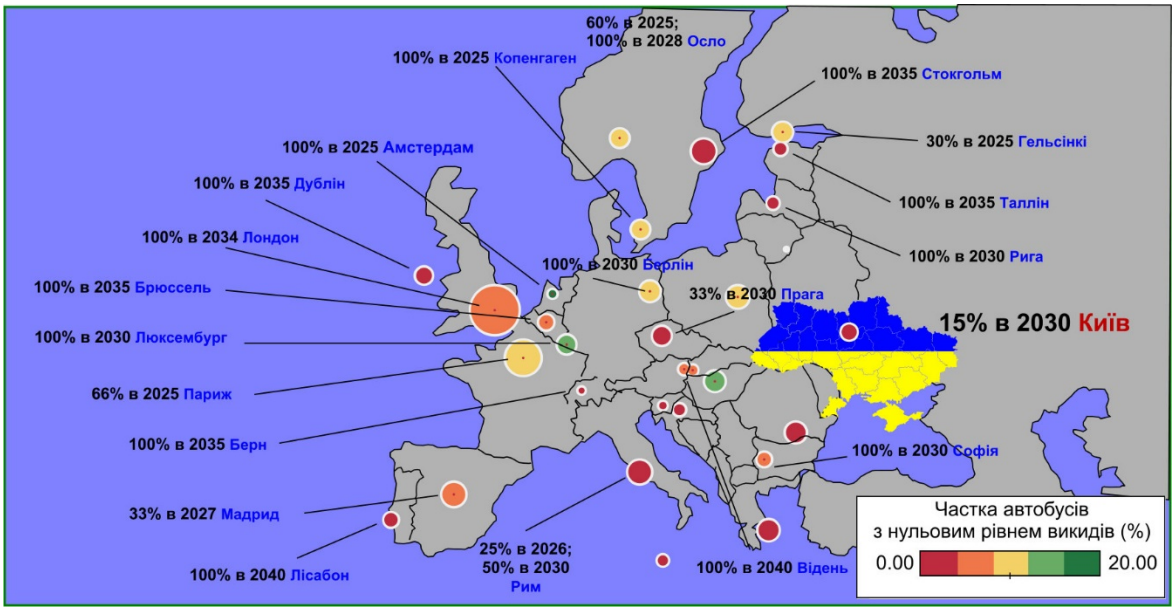


Рис. 1. Прогноз розвитку електричних автобусів [7]

ності населення залишається автобусна станція «АС Млинів» з якої відправляються автобуси в Рівненську, Волинську, Львівську, Київську область, а також чисельних районів.

За радянських часів перевезення пасажирів здійснювалося державним автотранспортним підприємством «Млинівське АТП-15641», на яке було покладено виконання функції виробничо-економічної діяльності щодо здійснення перевезення пасажирів в обласному і міжобласному сполученні, виконання технічного обслуговування і ремонту власної бази автобусів, здійснення договірних перевезень. У травні 1995 року Кабінет міністрів України ухвалив рішення про приватизацію АТП-15641, яке припинило свою діяльність в 2005 році [11]. На той час до 1991 року найчастіше застосовувалися пасажирські автобуси марок «ЛАЗ-695» (роки випуску 1956–2010), ПАЗ-672 (роки випуску 1967–1989), пізніше з 1995 році автобусами ПАЗ-3206 (рис. 2).

В період 1992–1999 роках, в умовах економічного спаду Незалежної України, перевезення пасажирів відбувалося вкрай важко. Перший приватний перевізник С.П. Зайда розпочинав свою роботу на пасажирському мікроавтобусі РАФ-2203 «Латвія» який вміщав 13 пасажирів, згодом на мікроавтобусі Мерседес-Бенц 207D пасажиромісткістю 18 чоловік. В міру економічного зростання в більшості перевізники почали застосовувати автобуси марок типу БАЗ А079 «Еталон» який вже вміщував 28 пасажирів.

Сьогодні перевезення пасажирів за маршрутом «Млинів – Дубно» здійснюється приватними перевізниками: ФОП «Зайда С.П.», приватним підприємством ПП «Деней», а також ТОВ «Укр-Пас-Транс».

Транспортна мережа маршруту проходить автомобільним шляхом територіального значення Т1806 з виїздом на міжнародний М19 (європейський Е85). Загальна протяжність від автостанції Млинів до автостанції Дубно становить 21 км (узагальнені техніко-експлуатаційні дані маршруту наведено на рис. 3).

Сьогодні в якості рухомого складу для перевезень пасажирів за маршрутом «Млинів-Дубно» застосовуються транспортні засоби у вигляді пасажирських мікроавтобусів і спеціально облаштованих для перевезень автобусів малого класу (рис. 4).

Цілком очевидно, що для забезпечення функціонування маршруту «Млинів-Дубно» найкращим є автобус марки БАЗ А079.25 (ФОП «Зайда С.П.»), однак важливим недоліком є його більша витрата дизельного палива в 15 л/100км і більші викиди шкідливих речовин (двигун з Euro 2).

Акумуляторний електричний автобус – це електричний автобус, який приводиться в рух електродвигуном і отримує енергію від тягових акумуляторів. Силовий агрегат електричного автобуса (рис. 5) складається з акумуляторної батареї та електродвигуна, між якими встановлений силовий електронний перетворювач, що регулює потік енергії від акумуляторної батареї

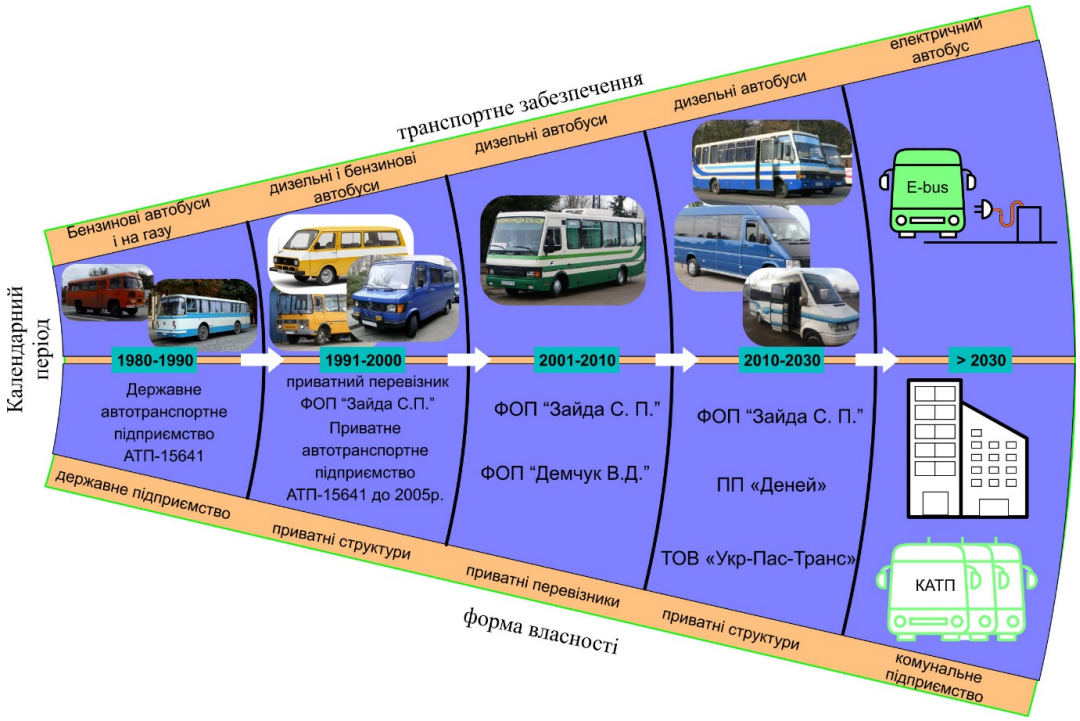


Рис. 2. Коротка історична довідка розвитку пасажирських перевезень сполученням «Млинів-Дубно»

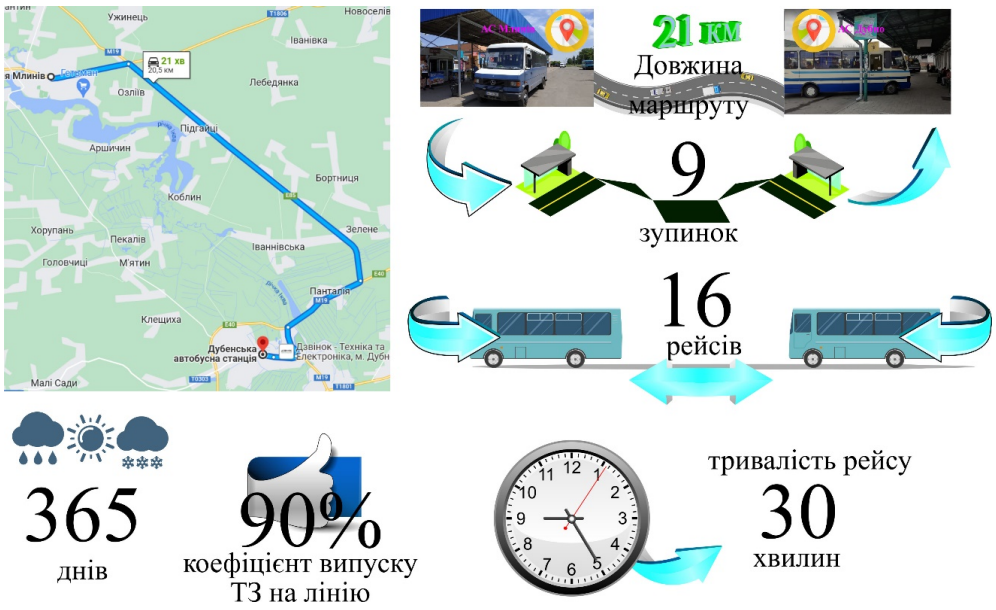


Рис. 3. Загальна характеристика маршруту «Млинів - Дубно»

Класифікаційна ознака	Перевізник		
	ФОП «Зайда С.П.»	ТОВ «Укр-Пас-Транс»	ПП «Деней»
Марка транспортного засобу	БАЗ А079.25	Мерседес Бенц Спринтер 412	Фольксваген LT-35
Тип транспортного засобу	Автобус	Мікроавтобус	Мікроавтобус
За видом перевезення	районні (місцевого сполучення)		
За протяжністю маршрутів	до 150 км		
За габаритною довжиною (клас)	Малий	Малий	Малий
за максимальною масою	Категорія М3 (маса 5540 кг)	Категорія М2 (маса 4200 кг)	Категорія М2 (маса 3900 кг)
За місткістю для пасажирів	клас II	Клас В	Клас В
Клас комфортності	***	**	**
За плануванням пасажирського салону	Чотирирядне	Трирядне	Трирядне
Тип двигуна	Дизельний Euro 2	Дизельний EURO 4	Дизельний EURO 3

Рис. 4. Коротка характеристика рухомого складу

до електродвигуна і навпаки (у разі рекуперативного гальмування). Система трансмісії передає енергію на колеса для приводу електробуса. Під час гальмування енергія може бути рекуперована для заряджання акумулятора. Інший спосіб зарядити батарею – скористатися зарядним інтерфейсом і зарядити її електроенергією з мережі [12].

Система акумуляторів є основним і єдиним джерелом енергії. Це означає, що вся необхідна енергія для руху автобуса надходить від акумулятора, і що ємність акумулятора визначає запас ходу електробуса [13].

Повністю гібридний автобус оснащений потужною електричною машино, яка може як виконувати роль електродвигуна для приведення автобуса в рух, так і працювати в якості електрогенератора, приймаючи енергію від гальмування. Відновлена енергія використовується для руху в чисто електричному режимі або для допомоги дизельному двигуну, забезпечуючи частину його тяги (гібридний режим).

Будь-який тип автобуса – дизельний, на пропані, бензиновий, електричний або інший – має свої переваги та недоліки, тому завжди розумно порівняти обрані варіанти і визначити, який з них найкраще відповідає потребам. Враховуючи, що

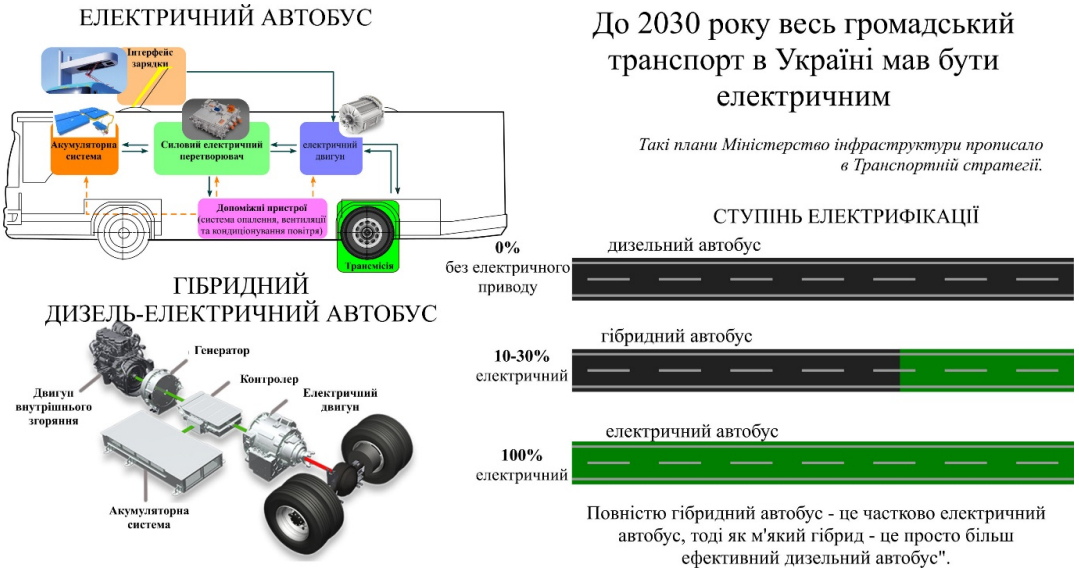


Рис. 5. Компоненти електричного та гібридного автобуса

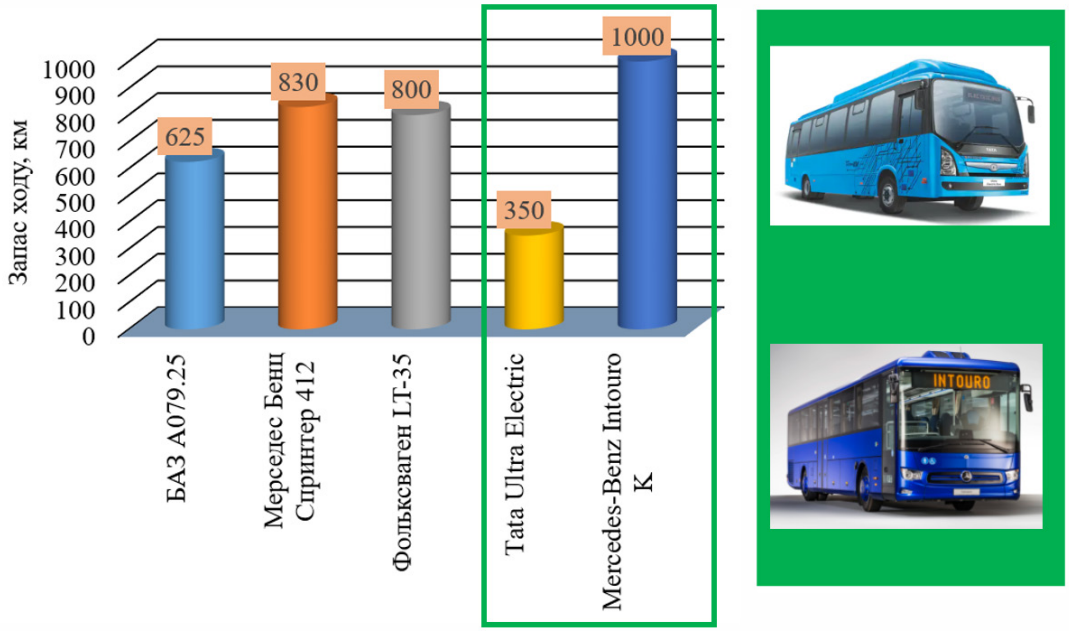


Рис. 6. Запас ходу автобусів, які застосовуються для перевезення пасажирів за маршрутом «Млинів-Дубно»

добовий пробіг автобуса складає 192 км необхідно буде вибирати електричний автобус, запас ходу якого буде складати більше 300 км (рис. 7).

Діючі автобуси для перевезення пасажирів можуть обходитися без дозаправки більше 600 км, оскільки за один день здійснюється сумарний пробіг в 200 км, це означає, що водій буде заправлятися один раз на два-три дні, електричному автобусі необхідно заряджатися щоденно в автопарку.

Висновки. Щоб зрозуміти різницю у виборі транспортних засобів для пасажирських перевезень, необхідно оцінити ступінь їх електрифікації та наслідки.

Пропонуються перспективні автобуси – дизель-електричний Mercedes-Benz Intouro K (запас ходу в 1000 км) та електричний Tata Ultra Electric (запас ходу 350 км).

Обираючи поєднання як повністю гібридних, так і електричних автобусів починаючи з 2025 року, не виникне жодних компромісів щодо комфортності, експлуатаційної продуктивності, а також очевидних екологічних переваг.

Список літератури:

1. Hawkins T. R., Singh B., Majeau-Bettez G., Strømman A. H. Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. *Journal of Industrial Ecology*. 2012. Vol. 17 (1), 53-64. URL: https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x.

2. Granovskii M., Dincer I., Rosen M. A. Economic and environmental comparison of conventional, hybrid, electric and hydrogen fuel cell vehicles. *Journal of Power Sources*. 2006. Vol. 159. 1186–1193. URL: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.11.086.

3. Apata O., Bokoro P. N., Sharma G. The Risks and Challenges of Electric Vehicle Integration into Smart Citie. *Energies*. 2023, 16, 5274. URL: https://doi.org/10.3390/en16145274.

4. Steinhilber S., Wells P., Thankappan S. Socio-technical inertia: Understanding the barriers to electric vehicles. *Energy Policy*. Vol. 60, September 2013, Pages 531-539. URL: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.04.076.

5. Китайські електробуси і електротаксі стрімко захоплюють міста. *Fra.org.ua* : веб-сайт. URL: https://fra.org.ua/uk/an/publikatsii/novosti/kitais-ki-ieliektrobusi-i-ieliektrotaksi-strimko-zakhopliuiut-svit.

6. Global electric bus market to reach 670k units in 2027 (from 112k in 2022), according to study. *Sustainable Bus* : веб-сайт. URL: https://www.sustainable-bus.com/news/global-electric-bus-market-forecast-2027/.

7. Zero-emission bus targets for Europe's capital cities: Status June 2022. *International Council on Clean Transportation*: веб-сайт. URL: https://public.tableau.com/app/profile/international.council.on.clean.transportation/viz/Zero-emissionbustargetsforEuropescapitalcitiesStatusJune2022/Dashboard2.

8. В українських містах побільшає електробусів – Верховна Рада підтримала законопроєкт. *Фокус* : веб-сайт. URL: https://focus.ua/uk/auto/539605-v-ukrainskih-gorodah-stanet-bolshe-elektrobusov-verhovnaya-rada-podderzhala-zakonoproekt.

9. У Львові закуплять 250 електробусів. Коли на них можна буде їздити. *Tvoemisto.tv* : веб-сайт. URL: https://tvoemisto.tv/news/u_lvovi_zakuplyat_250_elektrobusiv_koly_na_nyh_mozhna_bude_izdyty_113086.html.

10. Gady Shlasky. The advantages and challenges of electric buses. *Linkedin*: веб-сайт. URL: https://www.linkedin.com/pulse/advantages-challenges-electric-buses-gady-shlasky.

11. Перелік об'єктів, що підлягають обов'язковій приватизації у 1995 р. *Верховна Рада України* : веб-сайт. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/343%D0%B0-95-%D0%BF#Text.

12. Electric Bus Market In-depth Business Strategies & Professional Analysis (2020-2025). *OpenPR*: веб-сайт. URL: https://www.openpr.com/news/1974605/electric-bus-market-in-depth-business-strategies.

13. Boud Verbrugge, Mohammed Mahedi Hasan, Haaris Rasool, Thomas Geury, Mohamed El Baghdadi and Omar Hegazy. Smart Integration of Electric Buses in Cities: A Technological Review. *Sustainability* 2021, 13(21), 12189; https://doi.org/10.3390/su132112189.

Khitrov I.O. APPLICATION OF ELECTRIC BUSES FOR PASSENGER TRANSPORTATION

Electric transport has a long history and has made significant progress, but it still has a long way to go before being fully adopted as a primary mode of transportation. What if electric buses could become the transformative societal technology that helps us make this transition? In recent years, passenger transportation and the automotive world have been influenced by new forms of mobility driven by the rise of electric energy in the market.

From a mobility perspective, the trend suggests that in the near future, electric buses will become ubiquitous. They are viewed as an eco-friendly alternative to traditional diesel transport, capable of reducing greenhouse gas emissions and noise pollution, while also improving the quality of transportation services for the population.

At present, the implementation of a complete ban on the production of conventional passenger transport vehicles is impractical due to technical, economic, and social factors. Evaluating existing technologies and identifying promising innovations can contribute to the development of more efficient and affordable electric vehicles.

A balanced transition to environmentally friendly transport must be ensured, considering the needs of manufacturers, consumers, and the state.

Transport companies transitioning to eco-friendly modes of transport will be motivated not only by the benefits of reduced emissions but also by significantly lower operating costs, broader societal advantages, and economic well-being.

The article aims to highlight global trends in the development of the electric bus market and their application for organizing passenger transportation, followed by a targeted analysis of transport provision for the «Mlyniv-Dubno» route and an assessment of the feasibility of using such vehicles. The research findings may be useful for decision-making regarding the implementation of eco-friendly transport on regional routes and can serve as a foundation for further scientific studies on sustainable development.

Key words: *passenger transportation, intra-district service, electric bus, general structure, power reserve.*

ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.38
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/43

Обухова Т.Ю.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Зінченко А.Ю.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Барбаш В.А.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Душейко М.Г.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СТРУКТУР МЕЛАНІН-НАНОЦЕЛЮЛОЗА

Стаття присвячена дослідженню електрофізичних властивостей структур водорозчинного меланіну та наноцелюлози для створення біорозкладних і безвідходних електронних компонентів. Актуальність дослідження зумовлена тим що незважаючи на те що меланін та наноцелюлоза активно досліджуються як окремі шари та у поєднанні з неорганічними матеріалами, повністю органічні багатошарові структури залишаються менш вивченими.

Розлянуті в статті зразки представляли собою сендвіч-подібні структури графіт-меланін-наноцелюлоза-алюміній. Наноцелюлозні плівки товщиною близько 400 мкм були виготовлені за методологією, що базується на обробці сировини отриманої з очерету і забезпечує утворення однорідних поверхонь. Алюмінієві контакти наносилися методом магнетронного напилення, а шар водорозчинного меланіну – крапельним методом із водних розчинів (0.3–0.5%). Завершальний контакт наносився графітовою пастою.

В статті були розглянуті вольт-амперні характеристики органічних структур, які підтвердили залежність провідності від співвідношення меланіну та води, що узгоджується з відомими механізмами провідності меланіну, які залежать від рівня гідратації. Було показано що за позитивного зміщення на стороні наноцелюлози спостерігається нелінійність з пороговою напругою (5–6 В), яка зростала із концентрацією меланіну, в той час як. зворотне зміщення демонструє майже лінійну поведінку. Визначено, що зразки без шару меланіну мають значно нижчу провідність та симетричний резистивний характер.

З'ясовано, що освітлення знижує провідність структур майже на порядок, причому більші концентрації меланіну спричиняли виразніше падіння. Показано що при освітлені спостерігається зсув ВАХ у бік нижчих напруг, що може свідчити про фотоактивацію пасток у меланіні.

В роботі також була розлянута температурна залежність провідності, яка мала максимум при кімнатній температурі (22–24 °С), що вказує на наявність неглибоких пасток (0.02–0.03 еВ) на гетеропереході меланін-наноцелюлоза.

Отримані в статті результати підтверджують перспективність використання структур із меланіну та наноцелюлози для створення біорозкладних електронних пристроїв та підкреслюють важливість врахування напівпровідникових властивостей наноцелюлози.

Ключові слова: *меланін, наноцелюлоза, вольт-амперні характеристики, багатошарові органічні структури, органічний гетероперехід.*

Постановка проблеми. Наявність унікальних властивостей та особливостей структури меланіну і висока його провідність зумовлюють інтерес до досліджень для застосувань меланіну в електроніці вже понад 40 років [1, 2]. Іншим матеріалом, який користується значною увагою є наноцелюлоза, яку вирізняють з поміж інших можливості модифікації структури для утворення механічно міцних, гнучких та екологічно чистих підкладок для електронних пристроїв [3]. Найбільш вивченими для використання в електроніці є органічно-неорганічні структури або окремі органічні матеріали, у той час, як повністю органічні багатошарові структури вивчені набагато менше. Подальше дослідження електрофізичних властивостей таких структур сприятиме розвитку біоелектроніки, дозволить покращити характеристики наявних біосумісних пристроїв електроніки та зробити кроки у дослідженнях повністю біорозкладних та безвідходних електронних компонентів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Меланін є природним біополімером з унікальними властивостями. В останні десятиліття активно вивчаються механізми провідності меланіну, яка залежить від рівня гідратації, і запропоновано модель, що описує його як електронно-іонний гібридний провідник [4]. Завдяки π-спряженню, меланін демонструє електронну локалізацію, що впливає на його напівпровідникові властивості [1, 2]. Щодо оптичних характеристик, меланін ефективно поглинає ультрафіолетове та видиме випромінювання, перетворюючи його на теплову енергію [5, 6]. Виявлено кореляцію між розміром частинок меланіну та його спектральними властивостями. Переважно меланін використовується як чутливий матеріал для сенсорики [5, 7], проте також повідомляється про перспективи його застосування в фотовольтаїці [5] та джерелах живлення [8].

Наноцелюлоза – це матеріал, отриманий із целюлози, з розмірами в нанометровому діапазоні (<100 нм), який класифікується на три основних типи: целюлозні нановолокна, целюлозні нанокристали та бактеріальну наноцелюлозу. Завдяки нанорозмірності, наноцелюлоза характеризується великою площею поверхні, високою кристалічністю, прозорістю, а також покращеними механічними, термічними та бар'єрними властивостями [9]. Це робить її перспективною для використання в полімерних нанокомпозитах, що демонструють легкість, прозорість та підвищену механічну і термічну стабільність. З іншого боку, наноцелюлоза попри повідомлення про напівпровідникові властивості [10] найчастіше використовується виключно як підкладка [11–12], або як чутливий шар [13], без урахування можливого формування гетеропереходу з активними шарами.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження електрофізичних властивостей структур водорозчинний меланін – наноцелюлоза з метою подальшого використання для створення біорозкладних структур.

Виготовлення зразків: В роботі використовувалися структури типу «сендвіча» графіт-меланін-наноцелюлоза-алюміній (рис. 1).

Основи структури з наноцелюлозних плівок з очерету товщиною близько 400 мкм отримано за методологією, описаною в роботі [14]. Такі плівки завдяки обробці складаються з однорідних наночастинок розміром до 10 мкм що сприяє утворенню гладкої поверхні.

На першому етапі на тильну сторону наноцелюлозної плівки методом магнетронного напилення наносився суцільний тонкий (8 мкм) алюмінієвий контакт.

Після цього на лицьову сторону плівки крапельним методом наносився водний розчин меланіну, отриманий відповідно до патенту [15], за концентрації 0.3–0.5%. Використання водного розчину меланіну значно полегшує процедуру нанесення та сприяє частковому проникненню меланіну в верхні шари наноцелюлози що забезпечує гарну адгезію двох плівок та електричний контакт. Після висихання товщина плівки меланіну складала 1–2 мкм.

Верхній точковий контакт площею 1мм^2 і товщиною 50–70 мкм наносився струмопровідною графітовою пастою.

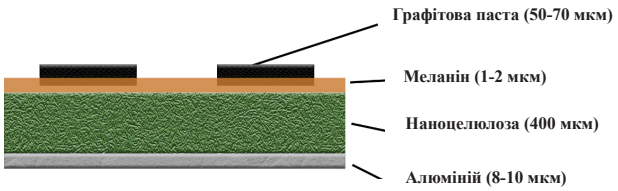


Рис. 1. Схема досліджуваної структури

Виклад основного матеріалу. Отримані результати. Вимірювання вольт-амперних характеристик відбувалися на кожному з контактів почергово, подаючи на підкладку додатну напругу 0–10 В та від'ємну відповідно. При обробці знаходилися середні значення даних, виміряних на обох контактах. Принципова схема вимірювального стенду зображена на рис. 2.

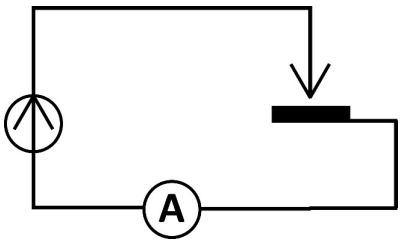


Рис. 2. Принципова схема вимірювального стенду

Вольт-амперні характеристики отриманих структур (рис. 3) демонструють строгу залежність провідності від співвідношення води та меланіну, що корелює з наявними даними щодо механізмів провідності меланіну [2], зокрема щодо впливу рівня гідратації на провідність.

Під час прикладення позитивного зміщення зі сторони наноцелюлози характеристики структур з меланіном мають нелінійну форму з пороговою напругою 5–6 В, значення якої зростає з ростом концентрації меланіну. Зворотна гілка ВАХ (позитивна напруга прикладена з боку меланіну) має практично лінійну форму. При цьому контрольний зразок без шару меланіну має у декілька разів нижчу провідність та повністю симетричну резистивну характеристику.

Отримані результати вказують на формування на гетеропереході меланін-наноцелюлоза енергетичного бар'єру, висота якого залежить від концентрації меланіну.

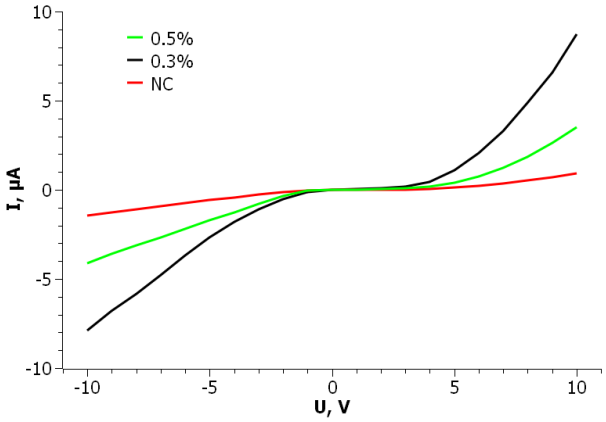


Рис. 3. Вольт-амперні характеристики структур за різної концентрації меланіну в умовах темряви

При освітленні (10000 Лк) для структур з шарами меланіну спостерігається зниження провідності майже на порядок (рис. 4), причому для структур з вищою концентрацією меланіну падіння провідності є більш виразним. Також варто звернути увагу на те, що вольт-амперна характеристика в умовах освітлення зсувається приблизно на 2–3 В ліворуч і діодний характер кривої спостерігається вже при прикладені позитивної напруги до меланіну, що може свідчити про фотоактивацію пасток в шарі меланіну, чим можна також пояснити падіння провідності.

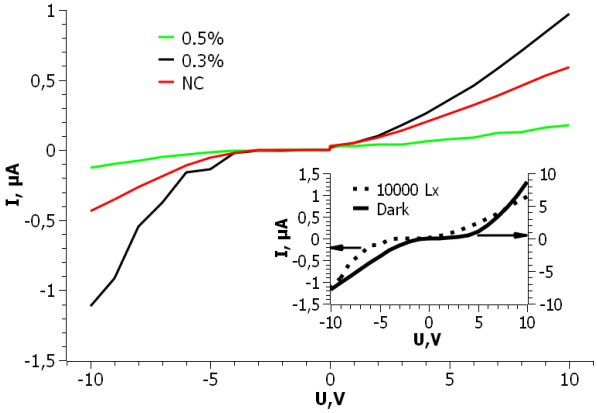


Рис. 4. Вольт-амперні характеристики структур за різної концентрації меланіну в умовах освітлення (10000 Лк). На вставці – порівняння ВАХ зразка з 0.3% меланіну в умовах темряви та освітлення

Для вимірювання температурних залежностей зразки розміщувалися в термостаті TABAI Міні Сабзеро МС-71. Використовувалася вже наведена вище схема вимірювання (рис. 2) з постійною напругою 10 В. Діапазон зміни температур склав 10–50 ºС.

Незалежно від концентрації меланіну та напрямку прикладеної напруги температурні залежності (рис. 5) мають максимум провідності в околі кімнатної температури (22–24 ºС) з подальшим зростанням опору. Наявність максимуму провідності за таких відносно низьких температурах може свідчити про наявність великої кількості неглибоких (0.02–0.03 ēВ) пасток, найймовірніше на гетеропереході меланін-наноцелюлоза.

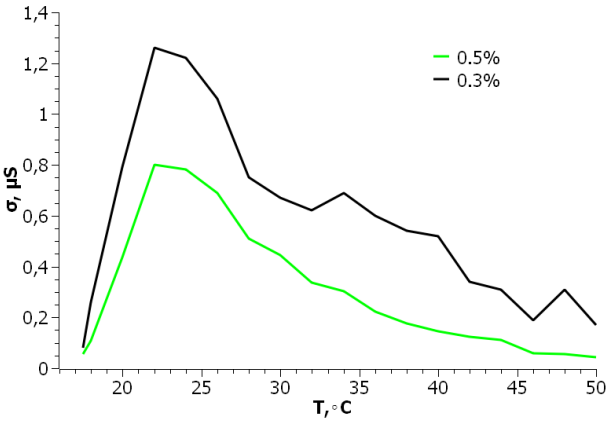


Рис. 5. Температурні залежності провідності структур за різної концентрації меланіну

Розраховані температурні коефіцієнти опору (таблиця 1) вказують на залежність швидкості падіння провідності від концентрації меланіну, що може бути пов'язаним з процесом дегідратації плівки під впливом температури.

Таблиця 1

Температурні коефіцієнти опору на різних ділянках

Концентрація меланіну	10-23 ºС	23-50 ºС
0.5%	-1.3 $ºC^{-1}$	0.24 $ºC^{-1}$
0.3%	-2.2 $ºC^{-1}$	0.66 $ºC^{-1}$

Висновки. Досліджені електрофізичні властивості структур меланін-наноцелюлоза підтверджують важливість врахування напівпровідникових властивостей наноцелюлози у процесі розробки і проектування органічних багатошарових структур.

Вольт-амперні характеристики структур демонструють ефект випрямлення, та залежність провідності від концентрації меланіну, що узгоджується з відомими механізмами провідності меланіну.

Під впливом освітлення спостерігається значне зниження провідності та зсув діодних характеристик, що свідчить про фотоактивацію пасток у шарах меланіну.

Температурна залежність провідності має максимум в області кімнатних температур, що вказує на наявність неглибоких пасток на гетеропереході меланін-наноцелюлоза.

Отримані результати демонструють перспективність використання структур з меланіну та наноцелюлози для створення біорозкладних електронних пристроїв.

Список літератури:

1. Jastrzebska M.M., Stepień K., Wilczok J., Porebska-Budny M., Wilczok T. Semiconductor properties of melanins prepared from catecholamines. *Gen Physiol Biophys*. 9 (4) : 373–383. 1990.
2. Matta M., Pezzella A., Troisi A. Relation between Local Structure, Electric Dipole, and Charge Carrier Dynamics in DHICA Melanin: A Model for Biocompatible Semiconductors. *J. Phys. Chem. Lett. American Chemical Society*. 11 (3) : 1045–1051. 2020.
3. Klochko, N.P., Barbash, V.A., Kopach, V.R. et al. Composite fabric with nanocellulose impregnated cotton for eco-friendly thermoelectric textile. *Cellulose* (2024).
4. Mostert A.B. Melanin, the What, the Why and the How: An Introductory Review for Materials Scientists Interested in Flexible and Versatile Polymers.: *10 Polymers. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. 13 (10) : 1670. 2021.
5. Vahidzadeh E., Kalra A. P., Shankar K. Melanin-based electronics: From proton conductors to photovoltaics and beyond. *Biosensors and Bioelectronics*. 2018. Vol. 122. P. 127–139.
6. Akın Ü., Çelik İ., Avcı Ç., Tuğluoğlu N., Yüksel Ö.F. Some optical properties of melanin thick film. *Materials Today: Proceedings*. 18 : 1972–1977. 2019.
7. Madkhali N., Alqahtani H.R., Alterary S., Albrithen H.A., Laref A., Hassib A. Characterization and electrochemical deposition of natural melanin thin films. *Arabian Journal of Chemistry*. 13 (4) : 4987–4993. 2020.
8. Shembel E., Kyrychenko V., Maksyuta I., Redko V., Zaderey N. Melanin as Semiconductor with Polymer Structure is Effective Modifier for Electrodes of High-Energy Li-Ion Batteries. *ECS Trans*. IOP Publishing. 99 (1) : 47. 2020.
9. Trache D., Tarchoun A.F., Derradji M., Hamidon T.S., Masruchin N., Brosse N., Hussin M.H. Nanocellulose: From Fundamentals to Advanced Applications. *Front. Chem. Frontiers*. 8. 2020.
10. Koga H., Nagashima K., Suematsu K., Takahashi T., Zhu L., Fukushima D., Huang Y., Nakagawa R., Liu J., Uetani K., Nogi M., Yanagida T., Nishina Y. Nanocellulose Paper Semiconductor with a 3D Network Structure and Its Nano–Micro–Macro Trans-Scale Design. *ACS Nano. American Chemical Society*. 16 (6) : 8630–8640. 2022.
11. Bettotti P., Scarpa M. Nanocellulose and Its Interface: On the Road to the Design of Emerging Materials. *Advanced Materials Interfaces*. 9 (4) : 2101593. 2022.
12. Costa S.V., Pingel P., Janietz S., Nogueira A.F. Inverted organic solar cells using nanocellulose as substrate. *Journal of Applied Polymer Science*. 133 (28). 2016.
13. Lapshuda V.A., V. Koval, V. Barbash, M. Dusheiko, O. Yaschenko, O. Yakymenko "Nanocellulose-Based Composites for Flexible and Biodegradable Humidity Sensors for Breath Monitoring" *IEEE Sensors Letters*, vol. 7, iss. 10, pp 1-4.
14. The influence of reed nanocellulose on the quality indicators of paper-basis for wallpapers / V. Barbash et al. *Proceedings of the NTUU "Igor Sikorsky KPI". Series: Chemical engineering, ecology and resource saving*. 2024. No. 1. P. 42–51.
15. Davidenko S. Recovering melanin from plant materials, for use e.g. in cancer treatment or as semiconductor, by extracting with sodium hydroxide solution, acidifying extract and purifying precipitate.: Пат. DE102004003801A1 USA. 2005.

Obukhova T.Yu., Zinchenko A.Yu., Barbash V.A., Dusheiko M.G.

ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF MELANIN-NANOCELLULOSE STRUCTURES

The article is dedicated to the study of the electrophysical properties of structures based on water-soluble melanin and nanocellulose for the development of biodegradable and zero-waste electronic components. The relevance of the research stems from the fact that although melanin and nanocellulose have been actively studied as separate layers and in combination with inorganic materials, fully organic multilayer structures remain less explored.

The samples considered in the article consisted of sandwich-like structures: graphite-melanin-nanocellulose-aluminum. Nanocellulose films, approximately 400 μm thick, were produced using a methodology based on processing raw materials derived from reeds, ensuring the formation of homogeneous surfaces. Aluminum contacts were applied using magnetron sputtering, while the water-soluble melanin layer was applied by a drop-casting method from aqueous solutions (0.3–0.5%). The final contact was applied using graphite paste.

The article examined the current-voltage (I-V) characteristics of the organic structures, which confirmed the dependence of conductivity on the melanin-to-water ratio. This aligns with known melanin conductivity mechanisms, which depend on the hydration level. It was shown that under positive bias on the nanocellulose side, nonlinearity with a threshold voltage (5–6 V) was observed, increasing with the concentration of melanin, whereas reverse bias exhibited almost linear behavior. It was determined that samples without the melanin layer had significantly lower conductivity and a symmetric resistive nature.

It was found that illumination reduces the conductivity of the structures by nearly an order of magnitude, with higher melanin concentrations causing a more pronounced drop. It was demonstrated that under illumination, the I-V characteristics shift toward lower voltages, which may indicate photoactivation of traps in melanin.

The study also examined the temperature dependence of conductivity, which exhibited a maximum at room temperature (22–24 °C), indicating the presence of shallow traps (0.02–0.03 eV) at the melanin-nanocellulose heterojunction.

The results obtained in the article confirm the potential of melanin and nanocellulose structures for the development of biodegradable electronic devices and highlight the importance of accounting for the semiconductor properties of nanocellulose.

Key words**:** *melanin, nanocellulose, I-V characteristics, multilayer organic structures, organic heterojunction.*

АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ ТЕХНІЧНИХ НАУК

УДК 656.7.082
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/44

Мандрик Я.С.
Українська державна льотна академія

ПРОВЕДЕННЯ АВІАЦІЙНОГО ПОШУКУ І РЯТУВАННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

У статті проведено аналіз законодавчо-нормативної, спеціальної літератури встановлено, що проблема підвищення ефективності застосування пошуково-рятувальних сил та засобів є недостатньо вирішеною. Аналіз якісного стану та ресурсно-економічних показників повітряних суден авіації Державної служби України з надзвичайних ситуацій свідчить, що укомплектованість авіації становить 60% від штатної чисельності, що є суттєвою перешкодою для забезпечення виконання широкого кола завдань з авіаційного пошуку та рятування.

Теоретично обґрунтовано та розроблено методику проведення авіаційного пошуку і рятування із застосуванням безпілотних літальних апаратів. Метою запропонованої методики є визначення та підвищення рівня ефективності ресурсного забезпечення авіаційного пошуку і рятування із застосуванням безпілотних літальних апаратів. Розроблена методика проведення авіаційного пошуку і рятування із застосуванням безпілотних літальних апаратів здійснюється поетапно, відповідно до поступової реалізації основних концептуальних ідей: визначення показників ефективності безпілотних літальних апаратів; визначення нормативів часу виконання завдання з пошуку та рятування; визначення результатів виконання завдання, тобто виявлення місця авіаційної події та постраждалих; розробка рекомендацій щодо перспектив застосування безпілотних літальних апаратів.

В результаті проведеного дослідження розроблено алгоритм підтримки прийняття рішень щодо застосування безпілотних літальних апаратів для пошуку постраждалих при авіаційних подіях.

Ключові слова: *авіаційний пошук і рятування, безпілотні літальні апарати, авіаційні події, методика проведення авіаційного пошуку і рятування із застосуванням безпілотних літальних апаратів.*

Постановка проблеми. Швидке отримання координаційними пошуково-рятувальними центрами наявної інформації необхідне для всебічної оцінки ситуації, якнайшвидшого прийняття рішень про оптимальний комплекс заходів та своєчасного приведення в дію пошуково-рятувальних сил та засобів з метою виявлення та порятунку осіб, що зазнають лиха, в максимально короткий термін. Від своєчасності виявлення постраждалих безпосередньо залежить кількість врятованих життів, тому необхідно розробити та реалізувати комплекс заходів, спрямованих на підвищення оперативності авіаційного пошуку та рятування постраждалих при авіакатастрофах, у зв'язку з чим тема дослідження є актуальною.

Завдання оптимального застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) вимагає розробки нових моделей та алгоритмів дій. На даний момент відсутні моделі та алгоритми підтримки прийняття рішень щодо застосування БПЛА для пошуку постраждалих при АП, тому дана тема є винятково актуальною.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Ми провели значний аналіз міжнародного досвіду із застосування БПЛА в сферах цивільного захисту. І як приклад, у країнах ЄС безпілотна авіація вже застосовується в різних сферах. Так, у Німеччині безпілотники використовують для перенесення дефібриляторів. БПЛА Deficopter дозволяє збільшити шанси на порятунок людей у важкодоступних місцях, куди машини швидкої допомоги фізично не зможуть доїхати. Долетівши до постраждалого, дрон повинен скинути дефібрилятор, яким зможуть скористатися постраждалі, або люди, які опинилися поруч із постраждалим, не чекаючи на прибуття медиків. Один такий безпілотник здатний доставити дефібрилятор пацієнту у радіусі 12 кв. км. протягом однієї хвилини, що підвищує шанс порятунку людини з 8% до 80% [1].

Зарубіжні дослідження спрямовані застосування БПЛА щодо пошуково-рятувальних операцій [2], пошуку постраждалих у важкодос-

тупних районах та зниження техногенних ризиків при надзвичайних ситуаціях [3]. У роботі [4] з використанням імітаційної моделі вивчається потенційне використання БПЛА для пошуку та визначення місцезнаходження постраждалих у гірських умовах.

Метою статті є теоретично обґрунтувати та розробити методику проведення авіаційного пошуку і рятування із застосуванням безпілотних літальних апаратів.

Виклад основного матеріалу. В досліджені проведено експертне опитування щодо актуальності застосування БПЛА для проведення авіаційного пошуку. Проводилася апріорна оцінка компетентності експертів. Апріорними називаються методи оцінки якостей експерта, за яких не використовується інформація про результати його участі у попередніх експертизах. Ступінь відповідності експерта до цього комплексу вимог характеризується його компетентністю, що визначає здатність до експертизи.

Для визначення компетентності експертів застосовувався документальний метод, заснований на вивченні матеріалів, що характеризують експертів. Опитування експертів проводилося індивідуально під час особистої зустрічі з кожним із них.

Була розроблена відповідна анкета. При заповненні анкети експертам було запропоновано обрати найбільш актуальні та важливі заходи на даний момент. Такому пункту слід присвоїти ранг 1. Наступному за важливістю пункту – ранг 2. Експертами виступали провідні фахівці Головного управління Державної служби з надзвичайних ситуацій міста Київ.

Таким чином, можна зробити висновок про те, що актуальність та важливість запропонованих заходів розподіляється таким чином у порядку значимості (таблиця 1).

Найбільш актуальним заходом щодо застосування БПЛА по відношенню до традиційних засобів авіаційного пошуку та рятування, на думку експертів, є забезпечення безпеки особового складу пошуково-рятувальних служб (ваговий коефіцієнт $\omega = 0{,}18$).

На основі проведених досліджень з проблеми підвищення ефективності забезпечення авіаційного пошуку і рятування ми виділили одинадцять етапів застосування БПЛА (див. рис. 1).

Здійснимо покроковий опис алгоритму.

Крок 1. Початок.

Крок 2. Аналіз обстановки, що склалася. Від якості та всебічності проведеного аналізу предметної області, безпосередньо залежить ефективність наступних рішень.

Крок 3. Залучення та нарощування пошуково-рятувальних сил та засобів. Даний етап є одним із ключових, оскільки від правильності залучених пошуково-рятувальних сил та засобів, і навіть їх достатності залежить кількість врятованих життів. Слід зазначити, що для залучення та доставки деяких зразків техніки може знадобитися більше доби, тому при виборі пошуково-рятувальних сил та засобів слід враховувати час прибуття та доцільність їх залучення.

Таблиця 1

Актуальність заходів щодо застосування БПЛА по відношенню до традиційних засобів авіаційного пошуку та рятування

№ з/п	Переважними рисами БПЛА по відношенню до традиційних засобів	Ранг
6	Забезпеченння безпеки особового складу	1
8	Висока економічна ефективність з урахуванням цінової політики	2
5	Ефективність дій – рятувальники, використовуючи БпЛА, здатні швидко зорієнтуватися в умовах надзвичайної ситуації та обрати ефективну стратегію дій для її ліквідації	3
1	Мобільність – відсутність потреби в спеціально обладнаних аеродромах чи спеціально підготовлених злітних майданчиках, а також враховуючи, що БпАК легко транспортуються легковими автомобілями, а деякі з них можуть переноситися вручну	4
3	Висока оперативність – загальний цикл застосування: від виїзду в район події до отримання документальних результатів, займає мінімум часу	5
10	Здатність використовувати як цільове навантаження радіоелектронну і спеціальну апаратуру для вирішення широкого кола завдань	6
9	Висока маневреність та точковість – можливість досить детального аерознімання невеликих за розміром об’єктів і ділянок у місцях, де отримати зображення іншими способами не рентабельно або технічно неможливо, наприклад, в умовах щільної міської забудови	7
4	Можливістю польоту в режимі зависання	8
2	Багаторазовість використання БПЛА	9
7	Екологічна чистота – використовуються малопотужні бензинові або безшумні електричні двигуни, чим забезпечується мінімальне навантаження на довкілля	10

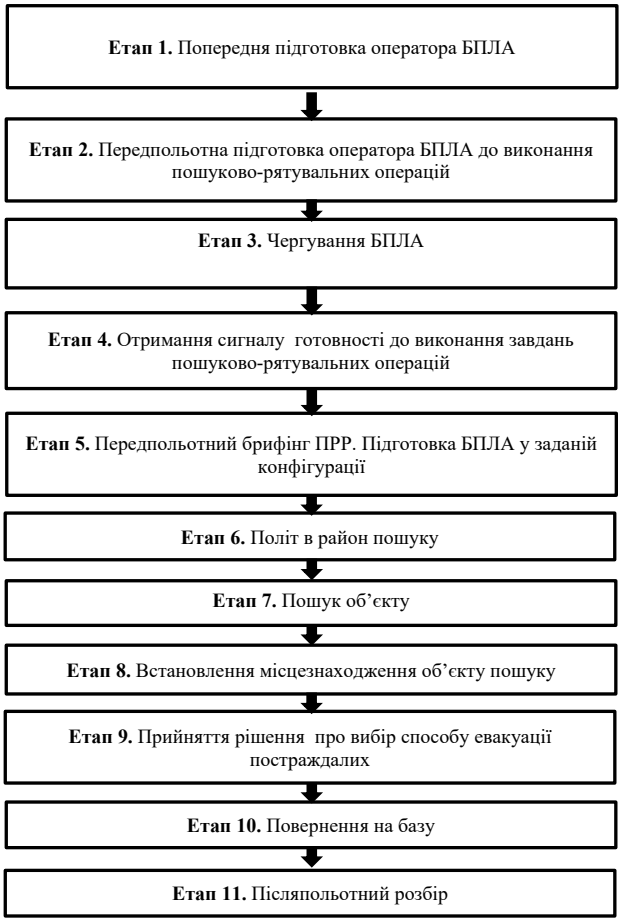


Рис. 1. Етапи застосування БПЛА

Крок 4. Збір та аналіз інформації з місця АП. Після того, як до місця події прибули перші підрозділи, з'являється достовірна інформація, безпосередньо з епіцентру подій. Тому важливо в найкоротші терміни її передати до вищого органу управління для аналізу та коригування прийнятих рішень

Крок 5. Прогноз ризиків. На цьому етапі здійснюється прогнозування виникнення ризиків, але для цього необхідно мати інформацію про природу виникнення факторів, що впливають на величину ризику. Слід зазначити, що виконання кроків 5 – 7 здійснюється одночасно з кроками 8 – 10.

Крок 6. Оцінка ризиків. Після виконання кроку 5 необхідно оцінити можливий вплив ризиків на життя та здоров'я людей. Якщо величина ризику перевищує допустиме значення, то необхідно вживати активних заходів щодо її зниження.

Крок 7. Контроль ризиків. Після оцінки ризиків необхідно здійснювати спостереження за їх величиною, оскільки можуть скластися несприятливі умови щодо проведення пошуку і рятування і величина ризику з прийнятної збільшиться до критичної. Необхідно здійснювати постійний моніторинг за величиною ризику.

Крок 8. Вибір типу БПЛА. Для отримання додаткової інформації та оптимізації процесу проведення пошуку та рятування пропонується використовувати БПЛА різних типів. Однак вибір конкретного БПЛА залежатиме від ситуації, в якій він застосовуватиметься.

Крок 9. Розрахунок швидкості та застосування БПЛА. Після вибору типу БПЛА розраховується його оптимальна швидкість та здійснюється безпосереднє проведення пошуково-рятувальних робіт (пошук постраждалих).

Крок 10. Аналіз інформації, одержаної з БПЛА. Після того, як БПЛА здійснив політ необхідно провести аналіз отриманої інформації.

Крок 11. Отримана інформація є інформативною? Якщо отриманої інформації недостатньо або вона не інформативна, необхідно повернутися до кроку 8 і вибрати інший тип БПЛА, що володіє іншими тактико-технічними характеристиками та продовжити покрокове виконання алгоритму.

Крок 12. Відсутня загроза життю та здоров'ю людей? У разі, якщо відсутня загроза життю і здоров'ю людей, отже, всіх постраждалих знайдено і немає подальшої необхідності в проведення пошуку і рятування. У разі, якщо існує загроза життю та здоров'ю людей, то здійснюється перехід до кроку 3.

Крок 13. Ліквідація наслідків аварії. Після того, як знайдено всіх постраждалих наявні сили необхідно направити на ліквідацію наслідків аварії.

Крок 14. Закінчення пошуково-рятувальної операції.

Таким чином, розроблений алгоритм дозволить ефективно проводити підтримку прийняття рішень щодо застосування БПЛА для пошуку постраждалих під час авіакатастроф.

В результаті проведеного дослідження розроблено алгоритм підтримки прийняття рішень щодо застосування БПЛА для пошуку постраждалих при АП (див. рис. 2).

Таким чином, розроблений алгоритм дозволить ефективно проводити підтримку прийняття рішень щодо застосування БПЛА для пошуку постраждалих під час авіакатастроф.

Метою запропонованої методики є визначення та підвищення рівня ефективності ресурсного забезпечення авіаційного пошуку і рятування із застосуванням БПЛА.

Розроблена методика проведення авіаційного пошуку і рятування із застосуванням безпілотних літальних апаратів здійснюється поетапно, відповідно до поступової реалізації основних концепту-

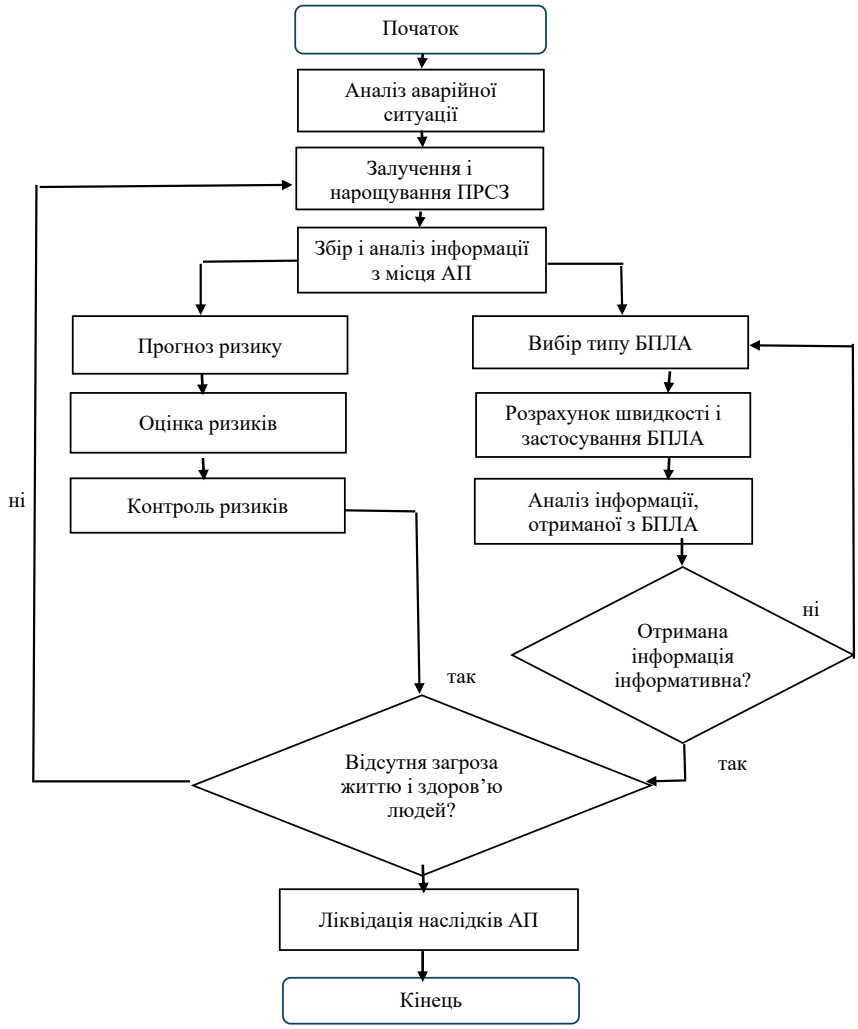


Рис. 2. Блок-схема алгоритму підтримки прийняття рішень щодо застосування БПЛА для пошуку постраждалих при АП

альних ідей: визначення показників ефективності БПЛА; визначення нормативів часу виконання завдання з пошуку та рятування; визначення результатів виконання завдання, тобто виявлення місця АП та постраждалих; розробка рекомендацій щодо перспектив застосування БПЛА.

Розкриємо сутність кожного етапу, спираючись на характеристику виділених компонентів методики проведення авіаційного пошуку і рятування із застосуванням безпілотних літальних апаратів.

Перший етап методики – визначення показників ефективності пошуково-рятувальних сил та засобів:

– час виконання завдання;
– результат виконання завдання;
– допуск виконання завдань в складних умовах;
– тип та призначення БПЛА;
– тактико-технічні характеристики БПЛА;
– спеціальне обладнання БПЛА;
– транспортно-десантна потужність;
– пошуково-рятувальна потужність;
– безпека.

Другий етап методики – визначення нормативів часу виконання завдання з пошуку та рятування БПЛА, а саме:

– час вильоту БПЛА;
– час візуального пошуку об'єкта;
– час радіотехнічного пошуку;
– час проведення евакуаційних робіт.

Нормативи часу вильоту чергового БПЛА відображено в таблиці 2.

Третій етап методики – виконання завдання пошуку і рятування. Визначення показників ймовірності виявлення і рятування об'єктів пошуку БПЛА, який реалізується на основі алгоритму визначення ймовірності виявлення об'єкта пошуку згідно методики Міжнародної організації цивільної авіації (ІСАО).

Таблиця 2

Час вильоту чергового БПЛА з моменту отримання команди (у хвилинах)

Оцінка	З готовності № 1	З готовності № 2	З готовності № 3
	БПЛА	БПЛА	БПЛА
Відмінно	8	10	45
Добре	9	15	55
Задовільно	10	20	60
Незадовільно	> 10	> 20	> 60

Четвертий етап методики – розробка рекомендацій щодо перспектив застосування БПЛА. А саме, комплекс рекомендацій щодо перспективної схеми базування БПЛА у підрайонах пошуку і рятування, підключення БПЛА до автоматизованої системи управління «Пошук».

До особливих випадків відносяться:

– відсутність інформації про місце лиха;

– неможливість проведення повітряного або наземного пошуку за метеорологічними умовами;

– віддаленість району лиха від місцезнаходження БПЛА більше, ніж їх тактичний радіус та інше.

Результати дослідження представлені рекомендаціями:

– раціональне розміщення на території України БПЛА має бути з урахуванням найбільш небезпечних регіонів (районів) щодо виникнення надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру, які потребують постійного обслуговування авіаційними пошуково-рятувальними силами і засобами для виконання пошуково-рятувальних (аварійно-рятувальних) робіт, якими є:

– південно-східний регіон України, особливо у пожежонебезпечний період;

– акваторії Чорного та Азовського морів;

– райони Закарпаття та Прикарпаття;

– зони розташування атомних електростанцій: Рівненської, Хмельницької, Південно-Української, Запорізької;

– басейни рік Дніпро, Дунай та Прут, особливо у весняний період.

Висновки та перспективи подальших досліджень. В результаті проведеного дослідження нами розроблено алгоритм підтримки прийняття рішень щодо застосування безпілотних літальних апаратів для пошуку постраждалих при авіаційних подіях. Даний алгоритм дозволить ефективно проводити підтримку прийняття рішень щодо застосування безпілотних літальних апаратів для пошуку постраждалих під час авіакатастроф. Реалізація цього алгоритму у вигляді програмного комплексу дозволить автоматизувати процес прогнозування, оцінки та контролю ризиків, а також скоротити тимчасові та когнітивні витрати на прийняття рішень.

Список літератури:

1. Безпілотна авіація у військовій справі : колект. моногр. / С. П. Мосов та ін. Київ: Інтерсервіс, 2019. 324 с.

2. Ashour R., Aldhaheri S., Abu-Kheil Y. Applications of UAVs in Search and Rescue. Unmanned Aerial Vehicles Applications: Challenges and Trends. Cham: Springer International Publishing. 2023. С. 169-200.

3. Lyu M. et al. Unmanned Aerial Vehicles for Search and Rescue: A Survey. Remote Sensing. 2023. Т. 15. №. 13. С. 3266.

4. Bravo R. Z. B., Leiras A., Cyrino Oliveira F. L. The use of UAV s in humanitarian relief: An application of POMDP based methodology for finding victims. Production and Operations Management. 2019. Т. 28. №. 2. С. 421-440.

Mandryk Ya.S. CONDUCTING AERIAL SEARCH AND RESCUE USING UNMANNED AIRCRAFT

The article analyzes the legislative and regulatory, special literature and establishes that the problem of increasing the efficiency of the use of search and rescue forces and means is not sufficiently resolved. Analysis of the qualitative condition and resource and economic indicators of aircraft of the State Emergency Service of Ukraine shows that the staffing of aviation is 60% of the full-time staff, which is a significant obstacle to ensuring the implementation of a wide range of tasks in aviation search and rescue.

The methodology for conducting aviation search and rescue using unmanned aerial vehicles is theoretically substantiated and developed. The purpose of the proposed methodology is to determine and increase the level of efficiency of resource provision of aviation search and rescue using unmanned aerial vehicles. The developed methodology for conducting aviation search and rescue using unmanned aerial vehicles is carried out in stages, in accordance with the gradual implementation of the main conceptual ideas: determining the efficiency indicators of unmanned aerial vehicles; determining the time standards for performing the search and rescue task; determining the results of the task, i.e. identifying the location of the aviation incident and victims; developing recommendations on the prospects for the use of unmanned aerial vehicles.

As a result of the research, an algorithm for supporting decision-making on the use of unmanned aerial vehicles for searching for victims in aviation incidents was developed.

Key words: *aviation search and rescue, unmanned aerial vehicles, aviation incidents, methods of conducting aviation search and rescue using unmanned aerial vehicles.*

Відомості про авторів

Абрамова А.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Барбаш В.А. – кандидат хімічних наук, професор, професор кафедри екології та технології рослинних полімерів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Баркалова Н.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Транспортний сервіс та логістика» Українського державного університету науки і технологій

Батюк С.Г. – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бережна О.Б. – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри мультимедійних систем і технологій Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця

Бойків М.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

Бойко С.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій Національного університету «Запорізька політехніка»

Борисенко Т.М. – головний конструктор ТОВ «Агенство продажу активів»

Боровскова Є.А. – магістр, інженер програмного забезпечення, AppsFlyer Ltd

Бушков В.Г. – аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення та кібербезпеки Державного торговельно-економічного університету

Василенко О.Д. – директор Науково-виробничого підприємства «БІОСИНТЕЗ»

Васянович В.М. – магістрант 2-го курсу кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Верпівський С.М. – заступник начальника кафедри автомобільної техніки Військової академії (м. Одеса)

Воронюк М.В. – викладач циклової комісії автоматизації технологічних процесів Київського індустріального фахового коледжу Київського національного університету будівництва та архітектури

Ворошилов А.І. – магістрант 2-го курсу кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Гаращук Б.В. – магістрант кафедри системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Гіоргізова-Гай В.Ш. – кандидат технічних наук, доцент кафедри системного проектування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Глоба Л.С. – доктор технічних наук, професор кафедри інформаційних технологій в телекомунікаціях Інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Голубєв Л.П. – кандидат технічних наук, доцент, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Грибовський О.М. – аспірант кафедри інформаційних систем та мереж Національного університету «Львівська політехніка»

Гуйда О.Г. – кандидат наук з державного управління, професор, завідувач кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Гурін Д.В – аспірант, старший викладач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки Харківського національного університету радіоелектроніки

Дерябіна І.О. – викладач кафедри авіаційного транспорту Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ

Дроменко В.Б. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерних систем та технологій Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Дуда О.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук Тернопільського технічного університету імені Івана Пулюя

Душейко М.Г. – провідний інженер кафедри мікроелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Євсєєв В.В. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки Харківського національного університету радіоелектроніки

Євчук Ю.Ю. – аспірант кафедри транспортних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

Жеребецький Н.В. – аспірант кафедри транспортних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

Жовнір Ю.І. – аспірант кафедри інформаційних систем та мереж Національного університету «Львівська політехніка»

Жуков О.А. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем та комплексів Вінницького національного технічного університету

Журід В.І. – викладач кафедри авіаційного транспорту Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ

Звєрєв В.П. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення та кібербезпеки Державного торговельно-економічного університету

Зінченко А.Ю. – студент кафедри мікроелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Іванишин В.В. – аспірант кафедри автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління імені професора А.П. Ладанюка факультету автоматизації і комп'ютерних систем Національного університету харчових технологій

Ільчук М.С. – аспірант Національного університету «Львівська політехніка»

Карапиш А.С. – аспірант кафедри «Транспортний сервіс та логістика» Українського державного університету науки і технологій

Карпін О.О. – кандидат технічних наук, головний інженер SRI ASR «Infineon Technologies»

Касерес А. – аспірант кафедри інформаційних технологій в телекомунікаціях Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кириченко Є.О. – аспірант кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича

Кириченко О.Л. – доктор філософії, асистент кафедри математичних проблем управління і кібернетики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича

Кирюша Б.А. – кандидат технічних наук, доцент кафедри системного проектування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ківа І.Л. – кандидат технічних наук, доцент, доцент Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Кішянус І.В. – старший викладач кафедри автомобільної техніки Військової академії (м. Одеса)

Коваленко В.І. – магістрант кафедри мультимедійних систем і технологій Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця

Козуб В.В. – магістр за спеціальністю «Системи захисту від несанкціонованого доступу» Державного університету «Київський авіаційний інститут»

Коротинський А.П. – доктор філософії, старший викладач кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Костіков О.А. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри цифрових технологій та проєктно-аналітичних рішень ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка»

Котов О.Б. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри транспортних технологій Національного університету «Запорізька політехніка»

Кравченко О.А. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень Одеського національного морського університету

Курганов І.Д. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автоматизації комп'ютерних наук та технологій Криворізького національного університету

Ладієва Л.Р. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лисенко М.С. – аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

Лобанчикова Н.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

Луговой Т.А. – аспірант кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень Одеського національного морського університету

Максимюк Т.А. – доктор технічних наук, доцент кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка»

Малиновський О.А. – старший викладач кафедри автотехнічного забезпечення Військової академії (м. Одеса)

Мандрик Я.С. – кандидат педагогічних наук, в.о. завідувача кафедри пошуку, рятування та авіаційної безпеки Української державної льотної академії

Марчук Д.М. – студент 6-го курсу кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка»

Могилянець Т.М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерної механіки Військової академії

Мошенский А.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій Навчально-наукового інституту муніципального управління та міського господарства Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Надутенко М.В. – кандидат технічних наук, завідувач відділу інформатики Українського мовно-інформаційного фонду Національної академії наук України

Невлюдов І.Ш. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки Харківського національного університету радіоелектроніки

Нікішин В.А. – викладач кафедри автомобільної техніки Військової академії (м. Одеса)

Новак Д.С. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних та комп'ютерних технологій Київського національного університету технологій та дизайну

Обухова Т.Ю – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри мікроелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Олещенко Л.М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Омецинська Н.В. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри інженерних систем та технологій Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Орлов М.В. – аспірант кафедри інформаційних систем та мереж Національного університету «Львівська політехніка»

Павловська Ю.О. – аспірантка кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Пазюра К.С. – магістрант кафедри мультимедійних систем і технологій Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця

Пацьора А.А. – аспірант кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки Національного університету біоресурсів і природокористування України

Петров Л.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільної техніки Військової академії (м. Одеса)

Платов І.М. – аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Потрашкова Л.В. – доктор економічних наук, доцент, професор кафедри мультимедійних систем і технологій Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця

Прокопович-Ткаченко Д.І. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій Університету митної справи та фінансів

Реута А.В. – викладач кафедри авіаційного транспорту Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ

Роса Т.В. – аспірант кафедри електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

Рудницький П.Є. – студент кафедри системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Савула А.А. – аспірант кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сагайда П.І. – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри цифрових технологій та проєктно-аналітичних рішень ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка»

Сазонов А.Ю. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Саричев В.І. – доктор економічних наук, доцент, професор кафедри економіки та економічної безпеки Університету митної справи та фінансів

Сарнацький В.В. – PhD, асистент кафедри інформатики і обчислювальної техніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Складанний Д.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Тарелкіна К.О. – студентка кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Фесюк І.І. – аспірант кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка»

Фоменко Г.Р. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

Фу Бінь – магістр 5-го курсу групи ІП-33мп кафедри інформатики і обчислювальної техніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Харламенко В.Ю. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автоматизації комп'ютерних наук та технологій Криворізького національного університету

Харченко О.І. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Транспортний сервіс та логістика» Українського державного університету науки і технологій

Хітров І.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних технологій і технічного сервісу Національного університету водного господарства та природокористування

Хрушков Б.С. – аспірант кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій Університету митної справи та фінансів

Цяпа С.М. – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

Чередниченко В.І. – студент кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Шелухін С.В. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри автомобільної техніки Військової академії (м. Одеса)

Науковий журнал

ВЧЕНІ ЗАПИСКИ
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО

Серія: Технічні науки

Том 35 (74) № 6 2024

Частина 2

Коректура • *Н. Славогородська*

Комп'ютерна верстка • *Н. Кузнєцова*

Адреса редакції:
Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського
м. Київ, вул. Джона Маккейна, 33
Електронна пошта: editor@tech.vernadskyjournals.in.ua
Сторінка журналу: www.tech.vernadskyjournals.in.ua

Формат 60×84/8. Гарнітура Times New Roman.
Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 29,96. Ум. друк. арк. 36,74. Зам. № 0125/041.
Підписано до друку 30.12.2024. Наклад 150 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»
65101, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1
Телефони: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 7623 від 22.06.2022 р.