

**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) № 3 2024**

**Частина 1**



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 технологій 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 загальноінженерних 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 № 17 від 27.06.2024 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.

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](http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua)

**ISSN 2663-5941 (Print)**

**ISSN 2663-595X (Online)**

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

# ЗМІСТ

## ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

Казимиренко Ю.О., Матюшин В.О.

ВИБІР МАТЕРІАЛІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ  
ГАРЯЧЕПРЕСОВАНИХ ПОРОШКОВИХ ВИРОБІВ.....1

## ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

Кудін О.П., Дударенко О.В.

ТЕМПЕРАТУРА УВІМКНЕННЯ ГАЗОВОГО ОБЛАДНАННЯ ЯК ФАКТОР ПОТЕНЦІЙНОЇ  
НЕБЕЗПЕКИ ДЛЯ АВТОМОБІЛЯ КАТЕГОРІЇ М1.....9

Кутковецька Т.О.

УДОСКОНАЛЕННЯ РОБОЧОГО ОРГАНУ ДЛЯ ВНУТРІШНЬОГРУНТОВОГО  
ЯРУСНОГО ВНЕСЕННЯ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ.....14

## АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

Бойко С.М., Котов О.Б., Лапіна О.С., Реута А.В., Гвоздік С.Д., Дерябіна І.О.

ОСОБЛИВОСТІ ОРГАНІЗАЦІЇ ЗАХОДІВ БЕЗПЕКИ В МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ  
ТРАНСПОРТНИХ ВУЗЛАХ.....20

## ЕЛЕКТРОНІКА

Бернацький А.В., Набок Т.М., Юрченко Ю.В., Сіора О.В., Соколовський М.В.,  
Бондарєва В.І., Лукашенко В.А., Данилейко О.О.

ВИКОРИСТАННЯ ФОТОЕЛЕКТРОННОГО ПОМНОЖУВАЧА ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ПРОЦЕСУ  
ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ.....25

## ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

Батаєв С.В., Мельник О.С.

АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ РОБОТИ, ПЕРЕВАГ ТА ВИКЛИКІВ У ВИКОРИСТАННІ  
ХМАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В УМОВАХ СЬОГОДЕННЯ.....31

Белоус Р.В., Крилов Є.В.

ОПТИМІЗАЦІЯ ВИКОРИСТАННЯ RAFT В РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМАХ З БАЗАМИ ДАНИХ.....37

Волк М.О., Саранча С.М., Гора М.В., Ковтун Є.І., Лабазов В.Г., Полозов Д.М.

МОДЕЛІ РЕСУРСІВ ТА ПРОГРАМНИХ ЗАВДАНЬ ДЛЯ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ  
ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ РОЗПОДІЛЕНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ.....42

Гайда А.Ю., Морозова Г.С.

МЕХАНІЗМ АДАПТИВНОГО НАВЧАННЯ ГЛИБОКИХ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ.....48

Головіна Н.В.

РОЗРОБКА НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ  
ПРИРОДНОГО ХАРАКТЕРУ.....53

Горбань Г.В., Козачок Ю.А.

ВИКОРИСТАННЯ ІНСТРУМЕНТІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В РОЗРОБЦІ  
ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ БІБЛІОТЕКОЮ.....58

Жученко Л.К.

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ВИПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ.....65

Завгородній В.В., Завгородня Г.А., Завгородній В.В., Глушенко А.І.

МЕТОД АНАЛІЗУ ПОДІБНОСТІ АУДІОЗАПИСІВ НА ОСНОВІ ХЕШ-ТОКЕНІВ.....71

Ісаєв Т.С., Кисіль Т.М.

МЕТОД РОЗПІЗНАВАННЯ ЕМОЦІЙ ЛЮДИНИ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ  
ЗА ДОПОМОГОЮ МАШИННОГО ЗОРУ.....77

|                                                                                                                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Каменський А.О.</b><br>РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ВЕБ-ДОДАТКУ ДЛЯ АНАЛІЗУ РЕЗУЛЬТАТІВ<br>СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕЛЕКТРОННО-КАТАЛІТИЧНОЇ КОНВЕРСІЇ<br>ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ.....                      | 86  |
| <b>Кондратець В.О., Сербул О.М., Мацуї А.М., Ярмоленко В.В.</b><br>МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СТЕРЖНЕВОГО МОЛОЛЬНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ<br>БАРАБАННОГО МЛИНА В КАСКАДНОМУ РЕЖИМІ ПОДРІБНЕННЯ РУДИ.....          | 93  |
| <b>Кропивницька В.Б., Кропивницький В.Р.</b><br>РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МОНІТОРИНГУ ТА АНАЛІЗУ ДАНИХ<br>ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ІНТЕРНЕТ З'ЄДНАННЯ.....                                         | 103 |
| <b>Кучеренко О.І., Вакалюк Т.А.</b><br>КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ ТА АЛГОРИТМІВ ПОБУДОВИ МАРШРУТІВ БПЛА.....                                                                                                 | 111 |
| <b>Кучинська К.А., Новіков П.В., Волощук В.А., Степанець О.В.</b><br>ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КОНДЕНСАЦІЙНОГО КОТЛА<br>ДЛЯ ПОБУДОВИ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА.....                                 | 117 |
| <b>Марчук Г.В., Любченко Д.В.</b><br>ГЕНЕРАЦІЯ ЛАБІРИНТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ АЛГОРИТМУ HUNT AND KILL.....                                                                                                    | 130 |
| <b>Мойсеєнко О.В.</b><br>ПРОГНОЗУВАННЯ КІБЕРАТАК НА ОСНОВІ МОНІТОРИНГУ ІНТЕНСИВНОСТІ ТРАФІКУ<br>В КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ.....                                                                            | 136 |
| <b>Morozov A.V., Levkivskiy V.L., Plechystyy D.D.</b><br>ACTIVATION FUNCTIONS IN NEURAL NETWORKS: OVERVIEW AND COMPARISON.....                                                                         | 144 |
| <b>Москалик Д.О., Антонюк Д.С.</b><br>ІМОВІРНІСНИЙ РОЗПОДІЛ СКЛАДНОСТІ ВХІДНИХ ЗАДАЧ ДЛЯ ДИСКРЕТНО-ПОДІЙНОГО<br>ТА АГЕНТНО-ОРІЄНТОВАНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО<br>ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ..... | 152 |
| <b>Oleshchenko L.M., Zheng Jinsong</b><br>LSTM NEURAL NETWORK IMPLEMENTATION FOR THE STOCK MARKET OPERATIONS<br>PREDICTING.....                                                                        | 160 |
| <b>Palonyi A.S.</b><br>DEVELOPMENT OF REQUIREMENTS FOR A DECISION SUPPORT SYSTEM FOR A SHIFT<br>SUPERVISOR TO MANAGE PROFESSIONAL STRESS OF AIR TRAFFIC CONTROLLERS.....                               | 172 |
| <b>Півторак Д.О., Цибульник С.О., Павловський О.М.</b><br>ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ІНФОРМАЦІЙНОГО СИГНАЛУ<br>В ОПР ДЛЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ.....                                      | 180 |
| <b>Platov I.M., Pavlovskiy O.M.</b><br>JUSTIFICATION FOR THE CONTROL SYSTEM FOR VERTICAL MOVEMENT<br>OF A SMALL-SIZED WALKING ROBOT.....                                                               | 187 |
| <b>Редько І.В., Сущенко В.С.</b><br>ПРОБЛЕМИ ПОВНОТИ У КЛАСАХ ОБЧИСЛЮВАНИХ ФУНКЦІЙ І ПРЕДИКАТІВ<br>НАД ІМЕНИМИ СТРУКТУРАМИ ДАНИХ.....                                                                  | 195 |
| <b>Ронський С.І.</b><br>ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ СТАТУС КОДІВ RFC 9110 У КОНТЕКСТІ ВАЛІДАЦІЇ HTTP<br>ЗАПИТУ.....                                                                                         | 202 |
| <b>Світій І.М., Черняк О.І.</b><br>ЩОДО АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ВИРОБНИЦТВОМ ПАРИ В КОТЛАХ ДКВР-10-13.....                                                                                             | 208 |
| <b>Serdyuk O.V., Stelmakh N.V.</b><br>REVIEW AND ANALYSIS OF METHODS OF RECONSTRUCTION AND MATHEMATICAL<br>DESCRIPTION OF CT IMAGES.....                                                               | 215 |
| <b>Сіданченко В.В.</b><br>ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДУ ПРОГНОЗУ ЧАСОВИХ РЯДІВ ДАНИХ ПРО ХІМІЧНИЙ СКЛАД<br>ЧАВУНУ НА ВИПУСКУ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ.....                                                                 | 222 |

|                                                                                                                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Сітайло М.С.</b><br>ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗБОРУ ДАНИХ З МЕТОЮ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ<br>ПРИ ПРОГНОЗУВАННІ КУРСУ КРИПТОВАЛЮТ.....                                                                        | 232 |
| <b>Сопов О.О., Жаріков Е.В.</b><br>ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ ЗАСОБИ ДЛЯ СИМУЛЯЦІЇ РОЗМІЩЕННЯ КОНТЕЙНЕРІВ<br>У ХМАРНОМУ ЦЕНТРІ ОБРОБКИ ДАНИХ.....                                                            | 239 |
| <b>Чигур І.І., Чигур Л.Я.</b><br>ОГЛЯД МЕТОДІВ І НАПРЯМКІВ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ<br>ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ.....                            | 248 |
| <b>ЕНЕРГЕТИКА</b>                                                                                                                                                                                 |     |
| <b>Капауз К.О.</b><br>ДОСЛІДЖЕННЯ СУШІННЯ НАСІННСВОГО ЗЕРНА ПШЕНИЦІ В РЕЖИМІ ПУЛЬСУЮЧОГО<br>МІКРОХВИЛЬОВОГО НАГРІВУ.....                                                                          | 256 |
| <b>Карпенко Д.С., Євтухова Т.О., Новосельцев О.В., Тесленко О.І.</b><br>РИНКОВІ ОСОБЛИВОСТІ ВНЕСКУ ВИРОБНИКІВ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ У ВТРАТИ<br>В МЕРЕЖАХ СИСТЕМ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ..... | 262 |
| ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....                                                                                                                                                                        | 271 |

# CONTENTS

## MATERIAL PROCESSING IN MECHANICAL ENGINEERING

**Kazymyrenko Yu.O., Matiushin V.O.**

SELECTION OF MATERIALS FOR TECHNOLOGICAL EQUIPMENT  
FOR THE MANUFACTURE OF HOT-PRESSED POWDER PRODUCTS.....1

## INDUSTRIAL ENGINEERING

**Kudin O.P., Dudarenko O.V.**

TEMPERATURE OF ACTIVATION OF GAS EQUIPMENT AS A POTENTIAL DANGER FACTOR  
FOR M1 CATEGORY VEHICLES.....9

**Kutkovetska T.O.**

IMPROVEMENT OF THE WORKING ORGAN FOR INTERNAL SOIL LAYER  
IMPLEMENTATION MINERAL FERTILIZERS..... 14

## AIRCRAFT AND AEROSPACE TECHNIQUES

**Boiko S.M., Kotov O.B., Lapina O.S., Reuta A.V., Gvozdk S.D., Derybina I.O.**

FEATURES OF THE ORGANIZATION OF SECURITY MEASURES  
AT MULTIMODAL TRANSPORT NODES..... 20

## ELECTRONICS

**Bernatskyi A.V., Nabok T.M., Yurchenko Yu.V., Siora O.V., Sokolovskyi M.V., Bondarieva V.I.,  
Lukashenko V.A., Danyleiko O.O.**

USING A PHOTOELECTRON MULTIPLIER FOR MONITORING  
THE LASER WELDING PROCESS.....25

## INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND AUTOMATION

**Bataiev S.V., Melnyk O.S.**

ANALYSIS OF THE PRINCIPLES OF OPERATION, ADVANTAGES AND CHALLENGES  
IN THE USE OF CLOUD TECHNOLOGIES IN TODAY'S CONDITIONS.....31

**Belous R.V., Krylov Ye.V.**

OPTIMIZATION OF RAFT USAGE IN DISTRIBUTED SYSTEMS WITH DATABASES..... 37

**Volk M.O., Sarancha S.M., Hora M.V., Kovtun Ye.I., Labazov V.H., Polozov D.M.**

MODELS OF RESOURCES AND SOFTWARE TASKS FOR SYSTEMS IMPROVEMENT  
OF FUNCTIONAL STABILITY OF DISTRIBUTED INFORMATION SYSTEMS.....42

**Hayda A.Yu., Morozova H.S.**

MECHANISM FOR ADAPTIVE TRAINING OF DEEP ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS.....48

**Holovina N.V.**

DEVELOPMENT OF A NEURAL NETWORK MODEL FOR MONITORING  
OF NATURAL FOREST FIRES.....53

**Horban H.V., Kozachok Yu.A.**

ARTIFICIAL INTELLIGENCE TOOLS USAGE IN THE DEVELOPMENT  
OF THE LIBRARY MANAGEMENT INFORMATION SYSTEM..... 58

**Zhuchenko L.K.**

CONTROL SYSTEM OF THE CARBON PRODUCTS BURNING PROCESS..... 65

**Zavgorodnii V.V., Zavgorodnya A.A., Zavgorodnii V.V., Hlushchenko A.I.**

METHOD OF ANALYSIS OF AUDIO RECORDINGS BASED ON HASH TOKENS.....71

**Isaiev T.S., Kysil T.M.**

A METHOD FOR RECOGNIZING HUMAN EMOTIONS IN REAL TIME USING MACHINE VISION.....77

**Kamenskyi A.O.**

DEVELOPMENT OF A WEB-BASED SOFTWARE APPLICATION FOR ANALYZING  
THE RESULTS OF SPECTROPHOTOMETRIC STUDIES OF ELECTRON-CATALYTIC  
CONVERSION OF CARBON DIOXIDE.....86

|                                                                                                                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Kondratets V.O., Serbul O.M., Matsui A.M., Yarmolenko V.V.</b><br>MATHEMATICAL MODELING OF THE ROD GRINDING LOAD OF A TUMBLING MILL<br>IN THE CASCADE MODE OF ORE GRINDING..... | 93  |
| <b>Kropyvnytska V.B., Kropyvnytskyi V.R.</b><br>DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR MONITORING AND ANALYZING DATA<br>TO EVALUATE INTERNET CONNECTION QUALITY.....                          | 103 |
| <b>Kucherenko O.I., Vakaliuk T.A.</b><br>CLASSIFICATION OF METHODS AND ALGORITHMS FOR CONSTRUCTING UAV ROUTES.....                                                                 | 111 |
| <b>Kuchynska K.A., Novikov P.V., Voloshchuk V.A., Stepanets O.V.</b><br>EXPERIMENTAL MATHEMATICAL MODEL OF A CONDENSING BOILER<br>FOR DIGITAL TWIN DEVELOPMENT.....                | 117 |
| <b>Marchuk G.V., Liubchenko D.V.</b><br>GENERATION OF MAZES USING THE HUNT-AND-KILL ALGORITHM.....                                                                                 | 130 |
| <b>Moyseenko O.V.</b><br>PREDICTION OF CYBER ATTACKS BASED ON TRAFFIC INTENSITY MONITORING<br>IN COMPUTER NETWORKS.....                                                            | 136 |
| <b>Morozov A.V., Levkivskyi V.L., Plechystyy D.D.</b><br>ACTIVATION FUNCTIONS IN NEURAL NETWORKS: OVERVIEW AND COMPARISON.....                                                     | 144 |
| <b>Moskalyk D.O., Antoniuk D.S.</b><br>PROBABILITY DISTRIBUTION OF INPUT TASKS COMPLEXITY FOR DISCRETE-EVENT<br>AND AGENT-BASED SOFTWARE DEVELOPMENT PROCESS MODELING.....         | 152 |
| <b>Oleshchenko L.M., Zheng Jinsong</b><br>LSTM NEURAL NETWORK IMPLEMENTATION FOR THE STOCK MARKET OPERATIONS<br>PREDICTING.....                                                    | 160 |
| <b>Palonyi A.S.</b><br>DEVELOPMENT OF REQUIREMENTS FOR A DECISION SUPPORT SYSTEM FOR A SHIFT<br>SUPERVISOR TO MANAGE PROFESSIONAL STRESS OF AIR TRAFFIC CONTROLLERS.....           | 172 |
| <b>Pivtorak D.O., Tsybulnyk S.O., Pavlovskii O.M.</b><br>OPTIC-ELECTRONIC CONVERTER OF INFORMATION SIGNAL INTO RESISTANCE<br>FOR AUTOMATIC CONTROL SYSTEM.....                     | 180 |
| <b>Platov I.M., Pavlovskiy O.M.</b><br>JUSTIFICATION FOR THE CONTROL SYSTEM FOR VERTICAL MOVEMENT<br>OF A SMALL-SIZED WALKING ROBOT.....                                           | 187 |
| <b>Redko I.V., Sushchenko V.S.</b><br>COMPLETENESS ISSUES IN THE CLASSES OF COMPUTABLE FUNCTIONS<br>AND PREDICATES OVER NAMED DATA STRUCTURES.....                                 | 195 |
| <b>Ronskyi S.I.</b><br>PRACTICAL APPLICATION OF RFC 9110 STATUS CODES IN THE CONTEXT<br>OF HTTP REQUEST VALIDATION.....                                                            | 202 |
| <b>Svityi I.M., Cherniak O.I.</b><br>ABOUT STEAM PRODUCTION AUTOMATIC CONTROL IN BOILERS DKVR-10-13.....                                                                           | 208 |
| <b>Serdyuk O.V., Stelmakh N.V.</b><br>REVIEW AND ANALYSIS OF METHODS OF RECONSTRUCTION AND MATHEMATICAL<br>DESCRIPTION OF CT IMAGES.....                                           | 215 |
| <b>Sidanchenko V.V.</b><br>JUSTIFICATION OF THE METHOD FOR FORECASTING TIME SERIES DATA<br>ON THE CHEMICAL COMPOSITION OF CAST IRON AT THE OUTLET<br>OF A BLAST FURNACE.....       | 222 |
| <b>Sitailo M.S.</b><br>RESEARCH ON THE DATA MINING PROCESS FOR USE IN CRYPTOCURRENCY PRICE<br>PREDICTION.....                                                                      | 232 |
| <b>Sopov O.O., Zharikov E.V.</b><br>INSTRUMENTAL TOOLS FOR CONTAINER PLACEMENT SIMULATION<br>IN CLOUD DATA CENTERS.....                                                            | 239 |

**Chyhur I.I., Chyhur L.Ya.**

OVERVIEW OF THE METHODS AND DIRECTIONS OF DEVELOPMENT OF INTELLECTUAL  
SUPPORT OF DECISION-MAKING TECHNOLOGIES IN THE AUTOMATION  
OF CONTROL PROCESSES..... 248

## **POWER ENGINEERING**

**Kapauz K.O.**

STUDY OF WHEAT SEED DRYING IN THE PULSE MICROWAVE HEATING MODE..... 256

**Karpenko D.S., Yevtukhova T.O., Novoseltsev O.V., Teslenko O.I.**

MARKET FEATURES OF HEAT PRODUCERS CONTRIBUTION TO LOSSES  
IN DISTRICT HEATING SYSTEM NETWORKS..... 262

INFORMATION ABOUT AUTHORS.....271



# ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 621.762:004

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.1/01>**Казмиренко Ю.О.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

**Матюшин В.О.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

## ВИБІР МАТЕРІАЛІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ГАРЯЧЕПРЕСОВАНИХ ПОРШКОВИХ ВИРОБІВ

Гаряче пресування є одним з енергоефективних методів одержання порошкових виробів, який уможливує у одному технологічному циклі реалізувати процеси їх формо- і структуроутворення. Проте складність процесу пов'язано із застосуванням спеціального обладнання для термодформаційного ущільнення формувальної суміші. Одержання порошкового виробу з високою розмірною точністю та заданою структурою не завжди реалізується варіюванням технологічних параметрів, а залежить від конструкції і виду прес-форми, комплектації і типу пресуючого пристрою та іншого устаткування. Організація технологічного процесу вимагатиме детальної проробки питань щодо матеріально-технічного забезпечення, зокрема стосовно вибору матеріалів, з яких виготовляється устаткування, що являє собою актуальну тематику для дослідження.

Мета роботи полягатиме у ґрунтовному аналізі переваг і недоліків матеріалів технологічного устаткування як важливої частини матеріально-технічного забезпечення організації процесу виготовлення гарячепресованих виробів.

В основу методології дослідження покладено ситуаційний підхід, запропоновано модель задачі, для чого сформульовано проблемні питання та визначені шляхи їх вирішення. Дослідження проведені на прикладі авторського зразку установки з механічним пресуючим пристроєм. Наводиться технічна характеристика устаткування: комплекту сталевих, керамічних, графітових прес-форм; керамічних штоків для передачі тиску пресування та технологічної кришки, яка застосовується під час термометрування температурного поля печі. Розглянуто вимоги та критерії вибору матеріалів для їх виготовлення. Визначено види бракування заготовок через дефекти технологічного устаткування; проаналізовано причини їх виникнення та заходи щодо усунення.

Результати роботи спрямовані на вирішення важливої науково-практичної проблеми матеріально-технічного забезпечення процесу виготовлення гарячепресованих порошкових виробів. Перспективи подальших досліджень пов'язані з комп'ютерним моделюванням температурних полів технологічного циклу гарячого пресування.

**Ключові слова:** порошкова металургія, прес-форма, обладнання, ущільнення, формувальна суміш, організація технологічного процесу, ситуаційний підхід.

**Постановка проблеми.** Гаряче пресування є одним з енергоефективних методів одержання порошкових виробів, який уможливує у одному технологічному циклі реалізувати процес їх формо- і структуроутворення. Консолідація компонентів відбувається від впливом прикладання певного тиску до попередньо розігрітої формувальної суміші. Якість і властивості майбутніх виробів залежить від обладнання, що забезпечує рівномірний розподіл температури і тиску, та тех-

нологічного устаткування, за допомогою якого здійснюються процеси спікання і пресування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Метод гарячого пресування застосовується для виготовлення високощільних виробів нескладної конфігурації. Це можуть бути плоскі деталі (диски, сегменти, пластини тощо), антифрикційні, фрикційні матеріали та біметалеві з'єднання [1, с. 101–107]. Поєднання процесів спікання з прикладанням зовнішнього навантаження

вимагатимуть застосування печей, зокрема зі спеціальним середовищем, обладнаних пресувальним пристроєм гідравлічного або механічного типу, вибір якого залежить від пластичних характеристик металевих і неметалевих порошків, структури та фізико-механічних властивостей майбутнього матеріалу. Проблематика розробки експериментального обладнання для технологій порошкової металургії висвітлена у монографії [2]. Автори аналізують процес ущільнення частинок непластичного матеріалу в контейнері прес-форми закритого типу з використанням різних видів пресування [2, с. 30–35], де за критерії обрано умови зберігання заготівкою пружних властивостей. Гаряче пресування тврдосплавних пластин розглянуто в роботі [3, с. 80–85], для їх виготовлення застосовуються порошки ВК8, Т5К10 та системи  $Al_2O_3-TiC-ZrO_2$ . Оригінальність технології полягатиме у оснащенні системою індукційного нагрівання графітової прес-форми, у яку укладаються попередньо спресовані холодним способом заготовки. Складний технологічний цикл завершує спікання тврдосплавних пластин у вакуумі. В статті [4, с. 70–74] розглянуто підготовчі етапи перероблення фторполімерів (політетрафторетилену, кополімеру тетрафторетилену з етиленом, полівінілденфториду) на прес-порошки різного гранулометричного складу з наступним брикетуванням при тисках до 50 МПа за допомогою гідравлічного пресу із зусиллям 5 т. Авторами визначена доцільність застосування відносно невеликих тисків пресування: оптимальні значення становлять 25–30 МПа з витримкою протягом 60–90 с. Це свідчить про нерентабельність використання складних потужних пресувальних пристроїв для пластичних матеріалів. Результати роботи [5, с. 983–993] показали ефективність застосування тиску близько 30 МПа для гарячого пресування керамічних матеріалів системи  $ZrB_2-SiC$ , які отримують із суміші порошків дибориду цирконію  $ZrB_2$ , карбиду бору  $B_4C$ , карбиду цирконію  $ZrC$ . Авторами встановлено, що прикладання тиску уможливило ефект скорочення ізотермічної витримки.

Аналіз робіт [1–5] показав складність процесу отримання порошкових виробів методом гарячого пресування, що пов'язано із застосуванням спеціального обладнання, яке дає можливість здійснювати термодформаційне ущільнення формувальної суміші. Проте в роботах недостатньо висвітлюються питання вибору та проектування технологічного устаткування, за участю якого порошкова заготівка перетворюється на виріб.

В роботі [6, с. 24–31] наводиться порівняльний аналіз конструкцій різних типів прес-форм (для одно- та двобічного пресування, ізостатичного пресування); автори статті формулюють вимоги до прес-форм за критеріями ущільненості порошкових матеріалів, їх тиску на бічну поверхню. Проаналізовані міцнісні характеристики і вартісні показники прес-форм з елементами, виготовленими з металевих, керамічних та вуглецевих матеріалів, але не дослідженим залишається вплив температури на їх окислювання та зносостійкість.

Метою гарячого пресування є одержання порошкового виробу з високою розмірною точністю та заданою структурою, що не завжди можна реалізувати лише варіюванням технологічних параметрів. Організація технологічного процесу вимагатиме детальної проробки питань щодо матеріально-технічного забезпечення, зокрема стосовно вибору матеріалів, з яких виготовляється технологічне устаткування, що являє собою **актуальну тематику** для дослідження.

**Постановка завдання.** Мета роботи полягатиме у ґрунтовному аналізі переваг і недоліків матеріалів технологічного устаткування як важливої частини матеріально-технічного забезпечення організації процесу виготовлення гарячепресованих виробів.

**Виклад основного матеріалу.** На підставі проведеного огляду літератури [1–7] авторами статті сформульовано (табл. 1) проблемні питання щодо організації технологічного процесу гарячого пресування порошкових виробів та визначені шляхи їх вирішення.

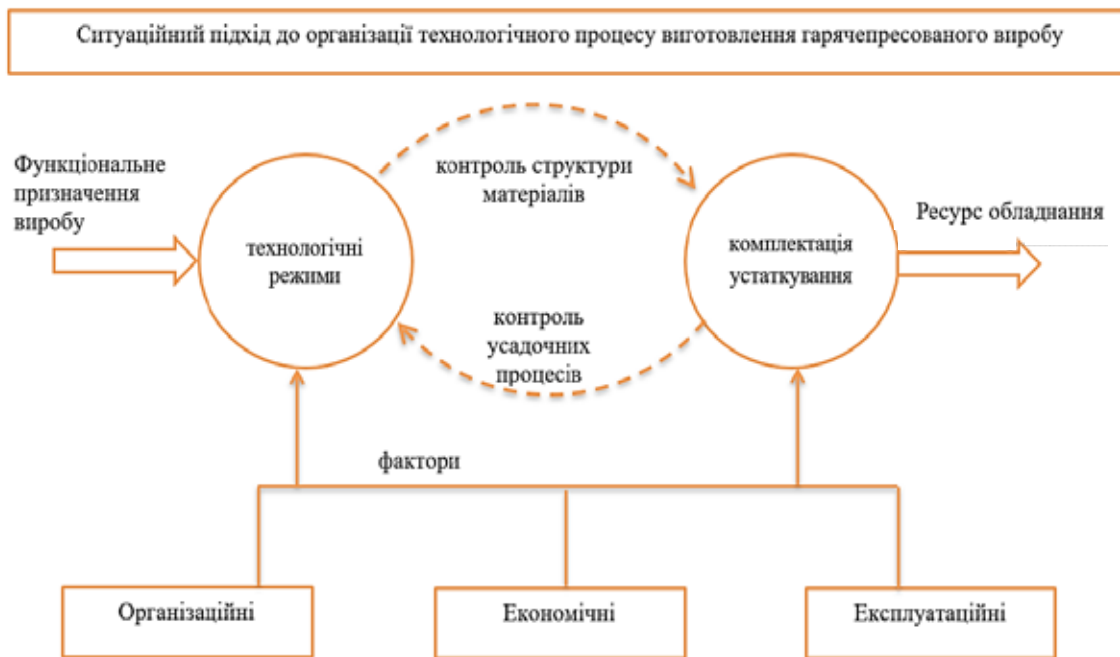
В основу методології досліджень покладено ситуаційний підхід, що описує розв'язання окремих управлінських ситуацій, які впливатимуть на організацію робочого, зокрема технологічного процесу [9]. На рис. 1 у графічному вигляді наведено модель задачі, яка описує організацію технологічного процесу отримання матеріалів певної структури і властивостей як систему матеріально-технічного забезпечення.

Об'єктом досліджень є процеси гарячого пресування металевих, неметалевих порошків та їх сумішей із застосуванням обладнання з механічним пресуючим пристроєм. Як приклад розглянуто авторський зразок установки (рис. 2а), за допомогою якої виконувались експериментальні роботи з формування стеклокомпозитів для глибоководної техніки [7] та біметалевих з'єднань, які складаються з бронзобабітового порошкового шару, напресованого на підготовлену певним чином сталеву підкладку [8].

**Аналіз шляхів вирішення проблемних питань організації технологічного процесу гарячого пресування порошкових виробів**

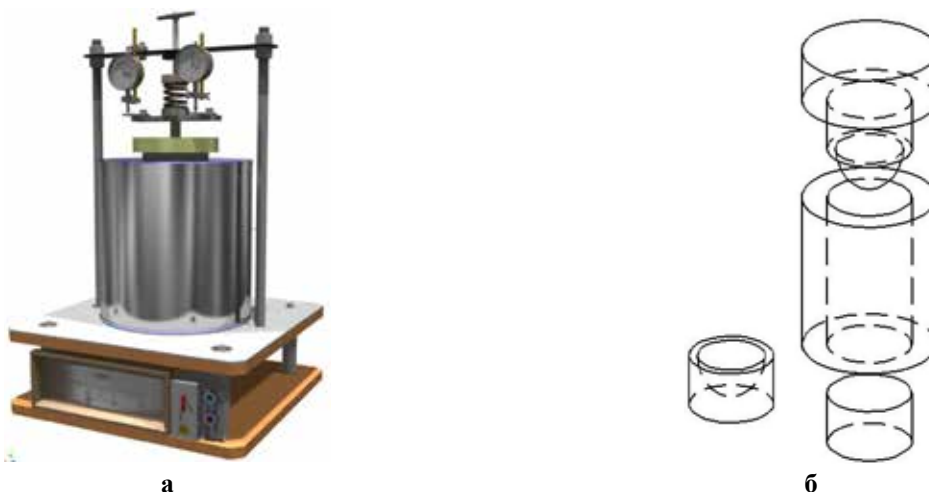
| Проблемні питання                                                                | Шляхи вирішення                                                                                                                                                          |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Рівномірне прогрівання формувальної суміші                                       | Застосування розбірної конструкції прес-форми; розрахунок товщини стінок, виходячи з теплофізичних властивостей матеріалу прес-форми; термометрування печі               |
| Контроль і вимірювання усадочних процесів                                        | Оснащення індикатором переміщення пуансону прес-форми, за допомогою якого проводяться вимірювання усадочних процесів за кожну хвилину; побудова кінетичних кривих усадки |
| Вимірювання та підтримка тиску пресування протягом всього технологічного процесу | Передача навантаження від механічного пристрою до прес-форми через шток                                                                                                  |
| Контроль структури і лінійних розмірів виробів                                   | Можливість зупиняти процес гарячого пресування                                                                                                                           |

Джерело: складено авторами



**Рис. 1. Модель задачі організації технологічного процесу виготовлення гарячепресованих виробів**

Джерело: складено авторами



**Рис. 2. Експериментальна установка (а) і прес-форма (б)**

Установка включає у себе шахтну лабораторну піч електроопору вертикального завантаження з номінальною температурою до 900 °С та окиснювальною атмосферою, блок управління та механічний пресуючий пристрій, який, у свою чергу, складається з траверси, що опирається на силові штанги і в якій розміщується навантажувальний гвинт, шток і силова пружина. Зусилля пресування передається через відтаровані силові пружини, які виготовлені зі сталей марок 60С2А і 65Г.

Процеси деформування і спікання порошків здійснюються у прес-формі (рис. 2б), у яку засипають формувальну порошок суміш. Прес-форма матиме рознімну конструкцію і складається з матриці, підставки та верхнього пуансона. Основним призначенням матриці (рис. 3а, в, г) є формування бокової поверхні виробу, підставки – нижньої поверхні та усунення висипання формувальної суміші. Прес-форма розташовується

у робочому просторі печі, закривається верхнім пуансоном (рис. 3б), через який на формувальну суміш передається навантаження від механічного пресуючого пристрою, як це показано на рис. 4.

Тиск пресування передається через пристрій з силовою пружиною на шток і пуансон прес-форми. Величина стискання пружини контролюється за допомогою спеціальної лінійки, що дає змогу підтримувати певну величину тиску або змінювати його протягом всього процесу спікання. Замість лінійки можна використовувати індикатор часового типу, як це показано на рис. 2а.

Шток для передачі зусилля крім осьового механічного навантаження зазнає термічного впливу та тертя з пуансоном прес-форми. Як показали експериментальні роботи, заклінювання штоку може призвести до поверхневої деформації виробу та нерівномірного розподілу щільності пресовки. У більшості випадків це заважатиме здійснювати процес прикладання тиску до розігрітої порошок суміші.



**а**  
( $d = 50$  мм;  $H = 50$  мм;  
 $\delta = 35$  мм)



**б**



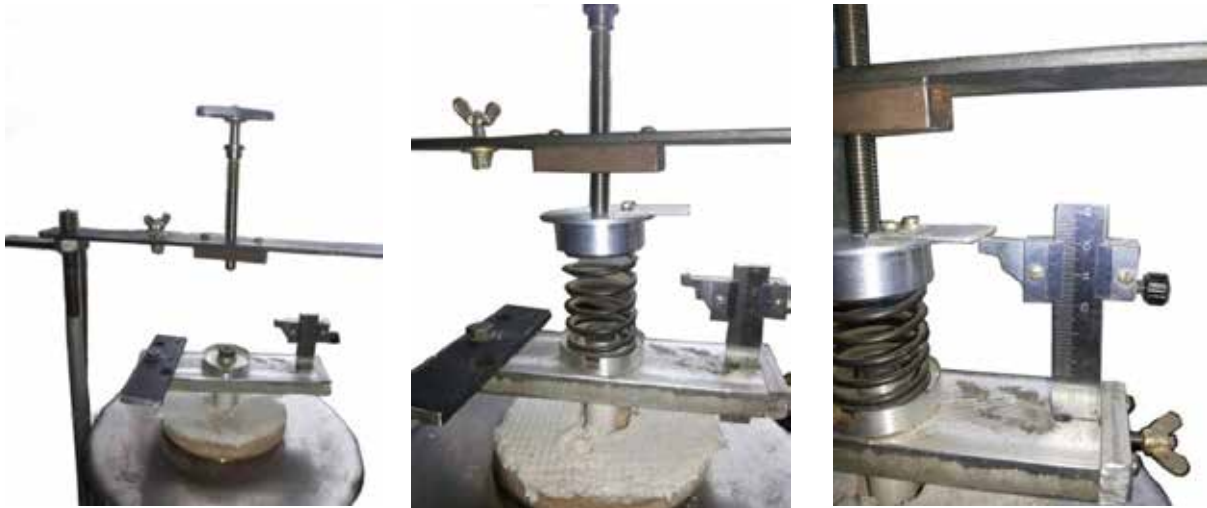
**в**  
( $d = 50$  мм;  $H = 60$  мм;  
 $\delta = 10$  мм)



**г**  
( $d = 50$  мм;  $H = 60$  мм;  
 $\delta = 30$  мм)

**Рис. 3. Компоненти для прес-форми: матриця (а, в, г) і графітові пуансони (б):**  
 $d$  – внутрішній діаметр;  $H$  – висота;  $\delta$  – товщина стінки

*Джерело: світлини зроблено авторами*



**Рис. 4.** Етапи прикладання тиску пресування

*Джерело: світлина зроблено авторами*

При виборі матеріалу для виготовлення штоку слід також враховувати різницю у термічних коефіцієнтах лінійного розширення (ТКЛР) з елементами прес-форми. Якщо технологічний процес виготовлення порошкового виробу включає у себе додаткові динамічні, зокрема вібраційні навантаження, то шток доцільно виготовляти з титанового деформуємого сплаву, наприклад, ВТ14. Для додаткового підвищення зносостійкості та коефіцієнту розсіювання енергії рекомендується нанесення плазмового покриття. Результати експериментальних досліджень, наведених у роботі [10], показали позитивний вплив технології нанесення плазмових покриттів з порошку ПН55Т45 на поверхню титанового сплаву марки ВТ14 на його деформувальну здатність та міцнісні властивості. Задля утворення мартенситної структури покриттів зразки загартовано при температурі 820 °С протягом 1 год з охолодженням у воді. Для технологій гарячого пресування з використанням

керамічних або графітових прес-форм (рис. 3а, в) доцільно застосовувати штоки, які виготовлені з корундової кераміки (рис. 5).

Вибір матеріалу прес-форми для виготовлення гарячепресованих порошкових виробів здійснюється на основі критеріїв складності їх конфігурації, бокового тиску порошку на стінки матриці. Крім того, прес-форма повинна забезпечувати рівномірне прогрівання формувальної суміші та чистоту поверхні майбутнього виробу. Експериментальні роботи включали у себе дослідження процесу гарячого пресування у графітовій (рис. 3а), сталевій (рис. 3б) та керамічній (рис. 3в) прес-формах з графітовим (рис. 3б) пуансоном. Сталеву форму виготовлено із нержавіючої сталі марки Х18Н9Т. Застосування цієї форми забезпечує рівномірний розподіл щільності і пористості формувальної суміші по всьому об'єму, форма матиме високу міцність та зносостійкість. Проте в процесі спікання порошок прилипає



**Рис. 5.** Комплект штоків для передачі тиску

*Джерело: світлина зроблено авторами*

до внутрішньої поверхні, що може призвести до великої кількості бракованих виробів та вимагатиме застосування спеціального змащування.

Для спікання металевих порошків, зокрема порошків сталі, алюмінію, нікелю доцільно застосовувати керамічні (корундові, алундові) прес-форми. Переваги їх застосування полягатимуть у хімічній стійкості та низькому ТКЛР. Але через високі статичні навантаження тонкостінні матриці можуть зазнавати руйнування. Тому керамічні прес-форми переважно використовуються для гарячого пресування пластичних порошків, процес структуроутворення яких не вимагатиме прикладання великого тиску (для даної установки це 2 МПа).

Застосування графітової прес-форми зменшує бічне тертя, покращує процес ущільнення, що, у свою чергу, забезпечує рівномірний розподіл порошкових компонентів у складі формувальної суміші. У прес-формі (рис. 2а), виготовленій з термічно необробленого графіту (марки МПГ6), герметично закритої графітовим пуансоном (рис. 2б) утворюється ефект спікання у спеціальній атмосфері СО. В роботі [7, с. 174–170] показана ефективність формування гарячепресованих стеклокомпозитів зі скляних мікросфер у графітових прес-формах. Це пояснюється тим, що дрібнозернистий графітовий пил є активним

відновником кремнезему, який сприяє прискоренню утворення центрів кристалізації  $\text{SiO}_2$ . При температурі вище ніж 300 °С графіт окислюється та вступає в реакцію з повітрям, що знаходиться у порах формувальної суміші, що сприятиме спіканню у атмосфері СО. Цей ефект було апробовано в роботі [8, с. 24–27] при гарячому суміші порошків бронзи і бабіту на луджену поверхню сталевого зразку (сталь 20). Застосування графітової прес-форми не вимагатиме додаткового змащування внутрішніх поверхней матриці та запобігає прилипанню порошку.

В табл. 2 наведено основні види дефекти гарячепресованих матеріалів через несправності технологічного устаткування; визначено можливі способи усунення і профілактичні заходи.

Більшість дефектів гарячепресованих матеріалів пов'язано з нерівномірним розподілом температури у робочому просторі печі. Профілактичні заходи включатимуть у себе термометрування температурних полів зі складанням температурних поправок, для чого застосовується технічна кришка, виготовлена з корундової кераміки. Технологічна кришка (рис. 6 а) має два отвори. У центральному отворі розташовується термометр скляний ртутний (ДСТУ 3742-98), призначений для точних вимірювань температури в діапазоні від 0 до 500 °С. Термометр поміщається

Таблиця 2

**Основні види дефектів гарячепресованих матеріалів через несправності технологічного устаткування**

| Вид бракування                                                 | Технологічна причина                                                                                                                                                                              | Способи усунення і профілактичні заходи                                                                                      |
|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Деформація поверхні виробу                                     | Заклінювання штоку. Сколи, подряпини та інші пошкодження внутрішньої поверхні матриці прес-форми. Нерівномірний розподіл температурного поля в печі                                               | Спостереження за усадочними процесами дає можливість зупинити спікання у певний час; термометрування робочого простору печі  |
| Нерівномірний розподіл щільності                               | Заклінювання штоку; перекошення пуансону прес-форми; нерівномірний розподіл температурного поля в печі                                                                                            | Контроль за правильним розташуванням пуансону, штоку; термометрування робочого простору печі                                 |
| Прилипання порошку до внутрішньої поверхні прес-форми          | Низька чистота внутрішніх поверхонь елементів прес-форми                                                                                                                                          | Своєчасне очищення прес-форми; обробка внутрішньої поверхні прес-форми графітовими змазками                                  |
| Дефекти поверхні виробів                                       | Задирки матриці призводять до виникнення численності рисок на поверхні пресовок, а недостатньо якісна обробка робочої поверхні пуансонів – до відколів на торцях пресовки, особливо на їх кромках | Контроль за шорсткістю внутрішньої поверхні матриці прес-форми; своєчасне очищення прес-форми                                |
| Відхилення по щільності в різних перетинах порошкових брикетів | Неправильне зняття навантаження                                                                                                                                                                   | Для запобігання явищу пружної післядії тиск пресування рекомендується знімати після повного остигання робочого простору печі |

Джерело: складено авторами



а



б

**Рис. 6. Технологічна кришка с отвором (а), у який вставляється термопара (б)**

*Джерело: світлина зроблено авторами*

безпосередньо у прес-форму (без пуансона) з формувальною сумішшю. У додатковому маленькому отворі розміщується хромель-алюмелева термопара, яка вимірює температуру у печі. Показники термопари реєструються за допомогою мілівольтметра типу Ш4501, який вбудований у конструкцію установки, як це показано на рис. 2а. Під час контрольних заходів з термометрування піч розігрівається до температури 500 °С зі швидкістю підйому температури 20 °С/хв. За різницями показників термопари і термометра для кожних наступних 50 °С встановлюється температурна поправка, яку далі враховують при складанні технологічного процесу.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з комп'ютерним моделюванням температурних полів технологічного циклу гарячого пресування металевих, неметалевих порошків та їх сумішей з використанням сталевих, графітових і керамічних прес-форм.

Результати роботи спрямовані на вирішення важливої науково-практичної проблеми матеріально-технічного забезпечення процесу виготовлення гарячепресованих порошкових виробів.

**Висновки.** В основу методології дослідження покладено ситуаційний підхід, запропоновано модель задачі, для чого сформульовано проблемні питання та визначені шляхи їх вирішення.

Дослідження проведені на прикладі авторського зразку установки з механічним пресуючим пристроєм і комплектом сталевих, керамічних, графітових прес-форм; керамічних штоків для передачі тиску пресування та технологічної кришки, яка застосовується під час термометрування температурного поля печі. Розглянуто вимоги та критерії вибору матеріалів для їх виготовлення.

Визначено види бракування заготовок через дефекти технологічного устаткування; проаналізовано причини їх виникнення та заходи щодо усунення.

#### Список літератури:

1. Гогаєв К. О., Радченко О. К., Нгуен К. К., Радченко Л. О. Одержання біметалів методами порошкової металургії (Огляд). *Сучасні проблеми фізичного матеріалознавства*. Київ : ІПМ НАН України. 2011. Вип. 20. С. 101–107.
2. Іцкович-Лотоцький Р. Д., Зелінська О. В., Іванчук Я. В. Технологія моделювання оцінки параметрів формоутворення заготовок з порошкових матеріалів на вібропресовому обладнанні з гідроімпульсним приводом : монографія. Вінниця : ВНТУ. 2018. 153 с.
1. 3.Кліменко С. А., Прокопів М. М., Створення нових типів конкурентоспроможних різальних пластин та виготовлення дослідної партії інструменту для механічної обробки важкооброблювальних матеріалів. *Наука та інновації*. 2018. № 14 (1). С. 80–85.
3. Пікула І. І., Кабат О. С. Визначення оптимальних технологічних параметрів брикетування полімерів. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2024. № 2. Р. 70–74.
4. Чорнобук С. В., Гончаренко А. О., Попов О. Ю., Макара В. А. Особливості фазо- та структуроутворення при реакційному гарячому пресуванні композитів системи  $ZrB_2$ -SiC. *Металофізика та новітні технології*. 2017. Том 39. Вип. 7. С. 983–993.
5. Навін Кумар, Аджая Бхарті, Маніш Діксіт. Типи прес-форм та стисливість різних матеріалів. *Порошкова металургія*. 2021. № 07/08. С. 24–31.

6. Kazymyrenko Yu., Solomoniuk N., Drozd O. Glass microspheres thermo-deformation sintering processes in the technologies of obtaining materials for underwater technical equipment. *POLISH MARITIME RESEARCH*. 2023. № 3 (119). Vol. 30. P. 174–180.

7. Казимиренко Ю. О., Лебедева Н. Ю. Закономірності формування покриття з порошків бронзи та бабіту методом гарячого пресування. *Технологічний аудит і резерви виробництва*. 2015. № 5/7 (25). С. 24–27.

8. Полянська А. Формування концепції розвитку підприємств на засадах ситуаційного управління. *Демократичне врядування*. 2012. Вип. 9. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/DeVr\\_2012\\_9\\_33](http://nbuv.gov.ua/UJRN/DeVr_2012_9_33) (дата звернення 24.05. 2024)

9. Kazymyrenko Yu. O., Lebedeva N. Yu., Makrukha T. O. Increasing the Damping Capability of Titanium Alloys by Deposition of Plasma Coatings Made from Titanium Nickelide. *Metallophysics and Advanced Technologies*. 2023. Vol. 45. № 4. P. 457–467.

### **Kazymyrenko Yu.O., Matiushin V.O. SELECTION OF MATERIALS FOR TECHNOLOGICAL EQUIPMENT FOR THE MANUFACTURE OF HOT-PRESSED POWDER PRODUCTS**

*Hot pressing is one of the energy-efficient methods of obtaining powder products, which makes it possible to implement the processes of their shaping and structure formation in one technological cycle. However, the complexity of the process is associated with the use of special equipment for thermal deformation compaction of the molding slurry. Obtaining a powder product with high dimensional accuracy and a given structure is not always realized by varying technological parameters, but depends on the design and type of mold, configuration and type of pressing device and other equipment. The organization of the technological process will require a detailed study of issues related to material and technical support, In particular, regarding the choice of materials from which the equipment is made, which is a relevant topic for research.*

*The purpose of the work will be a thorough analysis of the advantages and disadvantages of materials of technological equipment as an important part of the material and technical support of the organization of the process of manufacturing hot-pressed products.*

*The methodology of the study is based on the situational approach, a model of the problem is proposed, for which problematic issues are formulated and ways to solve them are determined. The research was carried out on the example of the author's sample of an installation with a mechanical pressing device. The technical characteristics of the equipment are given: a set of steel, ceramic, graphite molds; ceramic rods for the transfer of pressing pressure and a technological cover, which is used during the thermometry of the temperature field of the furnace. The requirements and criteria for the selection of materials for their manufacture are considered. The types of rejection of blanks due to defects in technological equipment are determined; The defect of their occurrence and measures for elimination are analyzed.*

*The results of the work are aimed at solving an important scientific and practical problem of material and technical support of the process of manufacturing hot-pressed powder products. Prospects for further research are related to computer modeling of temperature fields of the technological cycle of hot pressing.*

**Key words:** powder metallurgy, mold, equipment, compaction, molding mixture, organization of the technological process, situational approach.



# ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 629.3.01

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.1/02>**Кудін О.П.**

Національний університет «Запорізька політехніка»

**Дударенко О.В.**

Національний університет «Запорізька політехніка»

## ТЕМПЕРАТУРА УВІМКНЕННЯ ГАЗОВОГО ОБЛАДНАННЯ ЯК ФАКТОР ПОТЕНЦІЙНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ДЛЯ АВТОМОБІЛЯ КАТЕГОРІЇ М1

У даній роботі досліджено фактор потенційної небезпеки неправильного визначення і встановлення граничних температур роботи газобалонного обладнання для автомобілів категорії М1 із розподільним впорскуванням пропан-бутанової суміші при їх налаштуванні. Проаналізовано сучасний стан наукових досліджень щодо роботи газових систем на автомобільному транспорті та теплової підготовки двигуна, що працює на зрідженому нафтовому газі (LPG). Визначено механізм виникнення небезпечних факторів та їх вплив на герметичність і цілісність системи, показано вплив потрапляння пропан-бутанової суміші у рідкому агрегатному стані у ділянку магістралі від газового редуктора до газових форсунок. Описано можливі негативні наслідки таких регулювань, наголошено на недоцільності заниження температур роботи системи з огляду на безпеку експлуатації установки і герметичність паливних магістралей, що розраховані для парової фази пропан-бутанової суміші. Зазначається, що небезпека може становити раптовий миттєвий розрив газопроводу та утворення повільного витоку газу через ослаблені кріплення від термічного стиснення матеріалу гумового шланга, викликаного його замерзанням. На прикладі комплекту обладнання STAG 4 Qbox Plus обґрунтовано оптимальні температурні діапазони, необхідні для коректної роботи газової системи. Наведені рекомендовані значення основних параметрів, необхідних для правильної та безпечної роботи системи. Обговорюється розширений функціонал налаштувань блоку управління STAG Qbox Plus. Однією з його особливостей є можливість активації режиму «скидання надлишкового тиску» через газові форсунки в певних режимах роботи двигуна. Це дозволяє регулювати як межі тиску, так і періодичність відкриття газових форсунок. Акцентовано увагу на особливостях роботи розширеного функціоналу в режимах холостого ходу, під навантаженням і в режимах CUT-OFF.

**Ключові слова:** газове обладнання, автомобіль категорії М1, температура перемикавання, пропан-бутанова суміш, зріджений нафтовий газ, потенційна небезпека.

**Постановка проблеми.** Бажання знизити час роботи переобладнаного транспортного засобу на бензині з метою зменшення витрат на бензинове паливо призводить до неправильного обрання діапазону граничних температур роботи газового обладнання автомобіля. Вибір неоптимальних значень зазвичай може призводити до виникнення нештатних режимів роботи обладнання, виникненню ситуацій, що можуть викликати як аварійну зупинку транспортного засобу, так і його загоряння через утворення витоку палива у підкапотний простір. Правильне ж налаштування системи та вибір обґрунтованих значень її параметрів дозволяє зменшити вплив небезпечних факторів

і експлуатувати автомобіль із значною фінансовою економією.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання експлуатації транспортних засобів переобладнаних для роботи на зрідженому нафтовому газі в контексті українського законодавства були розглянуті у [1–2]. Фази теплової підготовки двигуна, його прогріву розглянуті у [3–6]. При цьому вченими розглядалась теплова підготовка двигуна з огляду на оптимальні режими роботи в частині економічності, кількості шкідливих викидів та тягових характеристик автомобіля. Питання безпеки виникнення витоку палива через обрані неоптимальні параметри налаштування системи

майже не розглядались і потребують детальної уваги.

**Постановка завдання.** Метою статті є визначення фактору потенційної небезпеки неправильного налаштування газового обладнання на автомобілі категорії М1, а саме свідоме заниження температурних діапазонів перемикання паливної системи автомобіля для роботи на газі. Визначення і обґрунтування граничних температур зменшить можливість виникнення нештатних випадків роботи системи та унеможливить виникнення загоряння переобладнаного автомобіля або його раптової зупинки.

**Виклад основного матеріалу.** Вимоги до систем, що застосовуються для переобладнання автомобілів категорії М1 для роботи на зрідженому нафтовому газі мають відповідати вимогам ЄПЕК ООН 67R-01 [1]. Але навіть при дотриманні вимог стандарту ООН існують потенційні фактори небезпеки, що можуть призводити до нештатних режимів роботи обладнання.

В якості прикладу розглядається автомобіль категорії М1 KIA Magentis 2.0 із двигуном G4KA, що був переобладнаний для роботи на зрідженому нафтовому газі із системою STAG Qbox Plus. До складу системи входять блок керування газовим впорскуванням STAG Qbox Plus, редуктор Tomasetto Nordic, датчик температури редук-

тора AC 2,2 kOm, датчик тиску парової фази газу із датчиком розрідження PS04 Plus, газові форсунки STAG W02. Газові форсунки під'єднані до редуктора газовим рукавом Fagumit d12 LPG/CNG з порогом тиску 0,45 МПа, з маркуванням E20 67R/01-110R.

Система управління газовим впорскуванням STAG Qbox Plus при своїй роботі відстежує значення температури газового редуктора через свій датчик температури, що конструктивно встановлюється безпосередньо на газовому редукторі, та температуру парової фракції газу через датчик тиску/температури газу PS-04 Plus. При цьому виробником програмно встановлено нижню температурну межу перемикання в 30 °С. Нижня межа для температури парової фази газу не встановлена і в базових налаштуваннях становить 0 °С. При виході температурних значень за межі допустимого діапазону система припиняє подачу газу і переводить двигун в режим роботи на бензині.

Слід зазначити, що на ринку газового обладнання присутні системи, які не мають власного датчика температури редуктора. В таких системах значення температури системи охолодження зчитується з системи штатної бортової діагностики OBD2. Такий підхід, з точки зору переобладнання і економічності простіший і легший, оскільки не потребує додаткових датчиків і підключень.

З іншого боку, це містить в собі потенційну небезпеку і похибку, оскільки зазвичай штатні датчики температури двигуна знаходяться безпосередньо на блоці двигуна, а редуктор-випаровувач підключається до системи охолодження в стороні. Тому значення температури на самому редукторі-випаровувачі буде відрізнятися від температури двигуна через довжину тосольних рукавів і віддаленість самого редуктора від блоку. Крім того, якість обігріву редуктора буде залежати від стану системи охолодження, якості протоку, стану водяного насоса, радіаторів системи охолодження та системи обігріву салону автомобіля. Зазвичай різниця між температурою блоку двигуна і редуктором-випаровувачем може скласти близько 20 °С.

При первинному налаштуванні системи виробником пропонується користувачеві обрати значення базових параметрів, які необхідні для справного функціонування системи.

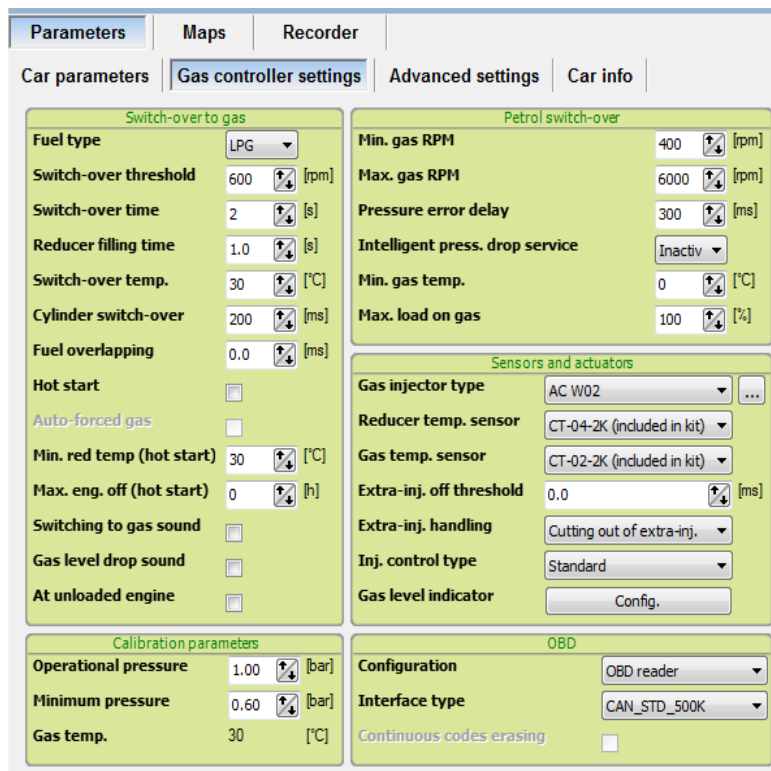


Рис. 1. Вікно введення базових параметрів роботи системи

Вікно введення базових параметрів роботи системи наведено на рисунку 1.

При цьому, за замовчуванням, значення температури редуктора та парової фракції газу, що необхідні для переходу роботи системи на пропан-бутанову суміш, встановлені як 30 °С редуктор і 0 °С газ відповідно. Ці значення не є оптимальними, оскільки повний перехід газової суміші з рідкої у парову відбувається за температури редуктора більше 40 °С [7]. Крім того, системи управління газовим впорскуванням STAG дозволяють припинити подачу газу при падінні температури парової фракції. Рекомендується встановлювати це значення не нижче 5 °С задля унеможливлення обмерзання паливної магістралі, а також запобігання термічного стиснення гумового рукава, внаслідок якого можливе послаблення кріплення і розгерметизація системи.

Слід зазначити, що такі деякі виробники обладнання взагалі не дають можливості користувачеві коригувати значення температур увімкнення установки, та не мають режиму вимкнення подачі палива за критичного зниження температури парової фракції.

На практиці часто зустрічаються ситуації, коли температура перемикання штучно знижується до 20 °С шляхом обрання невірної типу датчику температури з метою зменшення часу роботи автомобіля на бензині. Такий підхід містить в собі ряд небезпечних моментів. За низьких температур газового редуктора спостерігається стрімкий ріст тиску газу через випаровування рідкої фази поза редуктором-випаровувачем на ділянці між редуктором та газовими форсунками.

При перевищенні граничних значень тиску в 0,45 МПа можливий розрив газового рукава магістралі із подальшим витокм газу у підкапотний простір, що являє собою ризик займання паливно-повітряної суміші та загоряння автомобіля. Аварійний випадок розриву газового шлангу через високий тиск у магістралі після редуктора представлено на рисунку 2.

При цьому буде спостерігатися різке падіння тиску газу внаслідок розгерметизації паливної магістралі. Системи, які сертифіковані за стандартом ЄОК ООН 67R-01, містять в собі запорні клапани, що при різкому падінні тиску на ділянці від редуктора до форсунок, протягом 0,3 с перекривають подачу палива і переводять автомобіль для роботи на бензині. Також відомі випадки, коли внаслідок недостатнього прогріву газової суміші відбувається обмерзання магістралі, оскільки температура пропан-бутанової суміші у рідкому стані може сягати -42 °С.

Через вплив низьких температур відбувається термічне стиснення гумового матеріалу магістралі, що також призводить до послаблення хомутного кріплення та розгерметизації системи. При цьому, різкого падіння тиску в магістралі спостерігатися не буде, однак буде присутній постійний виток газу у підкапотний простір, що також становить небезпеку загоряння автомобіля. Зауважимо, що в процесі експлуатації внаслідок впливу температур елементів підкапотного простору та інших експлуатаційних факторів, гумові елементи системи втрачають свої властивості та їх граничні можливості щодо тримання тиску і проб на розрив знижуються. Тому необхідно періодично проводити їх заміну задля безпечної експлуатації установки.

Найбільш оптимальними на сьогоднішній день вважаються значення температури редуктора-випаровувача в 40 °С – для перемикання системи для роботи на газі, і мінімальне значення температури газу, при якому система продовжить роботу – це 5 °С. Зважаючи на те, що контролери газового впорскування STAG можуть працювати із редукторами різних конструкційних типів, в останніх версіях програмного забезпечення була передбачена функція скидання надлишкового тиску (Pressure release) газовими форсунками, рекомендовані значення параметрів якої вказані на рисунку 3.

Процеси впорскування газу за різних значеннях тиску у газовій магістралі на ділянці заміру між редуктором і форсунками розглядалися у [2]. Значення в 1,9 бар було обрано як медіанне середнє між робочим тиском системи в 1,0 бар та граничним тиском, що може витримати гума газова магістраль в 4,5 Бар.



Рис. 2. Розрив газового шлангу через високий тиск у магістралі після редуктора

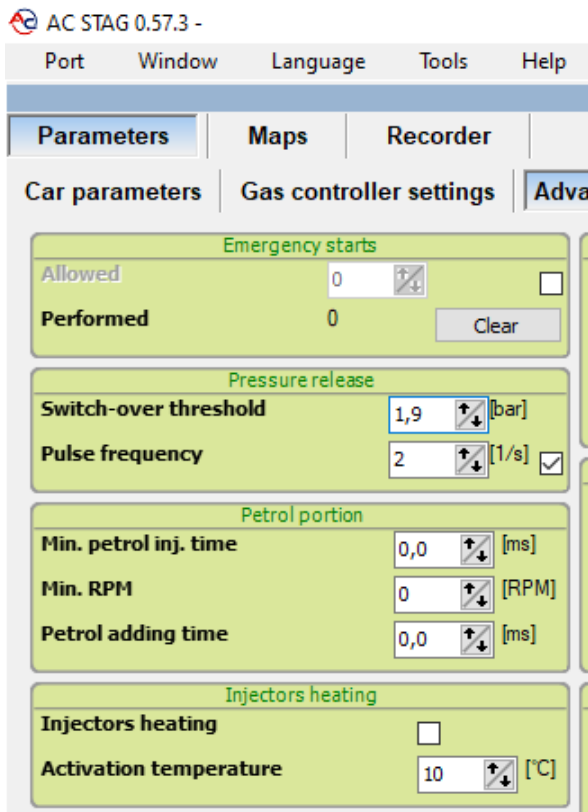


Рис. 3. Оптимальні значення параметрів для функції скидання надлишкового тиску

За обраних параметрів можливо попередити стрімке зростання тиску в газовій магістралі і не доводити його до критичних значень. При цьому слід зауважити, що даний функціонал більше призначений для боротьби із зростанням тиску в динамічних режимах і режимі CUT-OFF. В режимі холостого ходу його застосування може призвести до нестабільної роботи двигуна і вимагатиме коригування значень частоти імпульсів скидання тиску.

Контролери газового впорскування виробника AC Spolka, а саме блоки STAG серії Q (Qbox Basic, Qbox Plus, Qmax Basic, QMax Plus), також мають опцію коригування дози паливо-повітряної суміші відповідно до значень температури газу отриманих з датчику тиску і температури PS-04 Plus, яким комплектуються зазначені системи. Вікно коригування представлено на рисунку 4. Внесення змін можливе через вікно коригування карт у вкладці MAP, із підписом Gas temp.corr.

Зауважимо, що в заводських алгоритмах роботи блоку керування газовим впорскуванням STAG Q-серії вже внесені базові карти температурних корекцій. При цьому використання зазначеної карти безпосередньо не впливає на тиск газу на ділянці від редуктора до газових форсунок, а лише дозволяє адаптувати склад паливно-повітряної суміші у впускний колектор автомобіля.

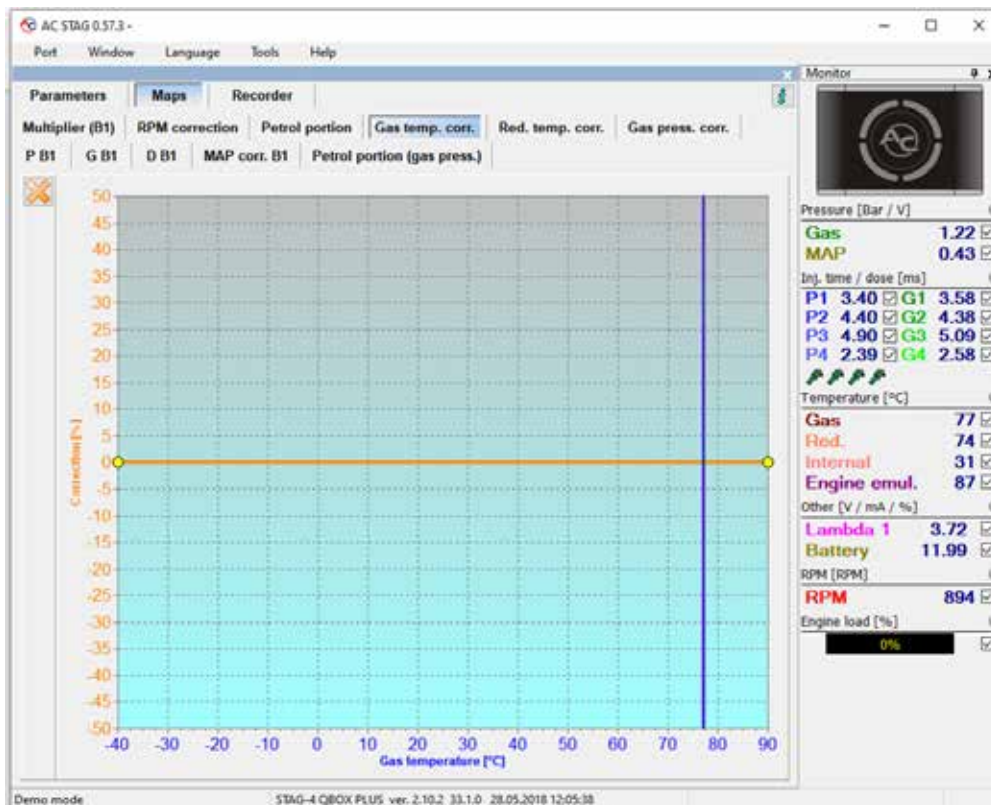


Рис. 4. Вікно налаштування корекції подачі палива в залежності від температури газу

На практиці, іноді зустрічається підхід, при якому діагности намагаються зменшувати відсоток корекції задля роботи системи за низьких температур газу. Таке застосування не рекомендується виробником, а також може призводити до зменшення часу впорскування до такого, що виходить за межі можливостей відпрацювання газовими форсунками. В свою чергу це може призвести до нестабільної роботи двигуна, появи пропусків запалення та неправильної роботи системи.

Доступний в налаштуваннях блоку механізм коригування газової суміші в залежності від тиску газу також розроблений для забезпечення оптимального складу паливно-повітряної суміші під час роботи двигуна автомобіля. Проте він не в змозі впливати на неконтрольований зріст тиску газу при його низьких температурах на етапі

зміни його агрегатного стану з рідкого до газоподібного. Слід зазначити, що цей процес відбувається у магістралі незмінного об'єму і може призводити до її руйнування у випадках виникнення значень тиску, що виходять за межі передбачуваних виробником магістралі.

**Висновки.** З огляду на викладене, на думку авторів, слід зазначити, що обрання занижених значень температурних меж роботи газового обладнання є значним потенційно небезпечним фактором, нехтування яким може призвести до розгерметизації газової системи, витоку палива з його послідуєчим загорянням, що, в свою чергу, може призвести до пошкодження автомобіля і навіть до його знищення. Також неоптимальні температурні режими роботи системи призводять до підвищеного зносу елементів системи і їх передчасного виходу з ладу.

#### Список літератури:

1. Питання експлуатації машин в законодавчих та нормативних актах. Автомобілі і трактори : навчальний посібник / В. І. Кубіч, О. М. Коробочка, О. Г. Чернета. Кам'янське : ДДТУ, ЗНТУ, 2018. 230 с.
2. Білинський Й. Й., Книш Б. П. Визначення кількісного вмісту компонентів парової фази суміші скрапленого нафтового газу. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2014. № 1 (36). С. 163–167.
3. Особливості теплової підготовки транспортного двигуна в умовах експлуатації / Д. С. Погорлецький, В. П. Матейчик, А. П. Полив'янчук, М. В. Володарець, М. П. Цюман. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*. 2019. Вип. 19. Т. 4. С. 286–297.
4. Chengcai Wei et al. Experimental and reaction kinetics studies on deflagration characteristics of liquefied petroleum gas-air mixture with different compositions in confined space. *Fuel*. 2024. Volume 358, Part A. P. 129972.
5. M. A. Ceviz, İ. V. Öner, A. R. İ. Kaleli, A. Mavi and A. K. Sen. Fuel Temperature Control in LPG Fuelled SI Engines. *IEEE International Conference on Electro/Information Technology*. 2012. P. 1–4.
6. Choongsik Bae and Jaeheun Kim. Alternative Fuels for Internal Combustion Engines. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2017. V. 36 (3), P. 3389–3413. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2016.09.009>.
7. ДСТУ EN 589:2017 Палива автомобільні. Газ нафтовий скраплений. Технічні вимоги та методи контролювання (EN 589:2008+A1:2012, IDT). Київ, 2018. 14 с. (Інформація та документація).

#### Kudin O.P., Dudarenko O.V. TEMPERATURE OF ACTIVATION OF GAS EQUIPMENT AS A POTENTIAL DANGER FACTOR FOR M1 CATEGORY VEHICLES

*This work investigates the potential danger factor of incorrect determination and setting the operating temperature limits for LPG equipment for M1 category vehicles with sequential propane-butane injection during their adjustment. The current state of scientific research on the operation of gas systems in automotive transport and the thermal preparation of an engine operating on liquefied petroleum gas (LPG) has been analyzed. The mechanism of danger factors' emergence and their impact on the system's tightness and integrity have been determined, demonstrating the influence of propane-butane mixture penetration in the liquid aggregate state into the section of the main gas line from the gas reducer to the gas injectors. Possible negative consequences of such adjustments are described, emphasizing the inadvisability of lowering the system's operating temperatures due to safety concerns, regarding the installation's operation, and the tightness of fuel lines designed for the vapor phase of the propane-butane mixture. It is noted that the danger may be sudden instant rupture of the gas line and the formation of a slow gas leak due to weakened fastenings from thermal compression of the rubber hose material, caused by its freezing. Optimal temperature ranges necessary for the correct operation of the gas system are substantiated using the STAG 4 Qbox Plus equipment set as an example. Recommended values of basic parameters required for the system's correct and safe operation are provided. The extended functionality of the STAG Qbox Plus control unit settings is discussed. One of its features is the ability to activate the excess 'pressure release' mode through the gas injectors in certain engine operation modes. This allows adjusting both the pressure limits and the periodicity of opening the gas injectors. Attention is focused on the features of the extended functionality operation in idle, under load, and in CUT-OFF modes.*

**Key words:** gas equipment, M1 category vehicle, temperature of activation, propane-butane mixture, liquefied petroleum gas, potential danger factor.

**Кутковецька Т.О.**

Уманський національний університет садівництва

## УДОСКОНАЛЕННЯ РОБОЧОГО ОРГАНУ ДЛЯ ВНУТРІШНЬОГРУНТОВОГО ЯРУСНОГО ВНЕСЕННЯ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ

*В статті проведені теоретичні дослідження щодо існуючих способів, технологій та технічних засобів для внесення мінеральних добрив, а також наведено конструкцію удосконаленого робочого органу для внутрішньогрунтового ярусного внесення добрив. В результаті виконаних досліджень нами було встановлено, що існують різні способи внесення мінеральних добрив, проте локальний внутрішньогрунтовий спосіб внесення є найефективнішим, так як сприяє кращому засвоєнню рослинами поживних речовин, що в результаті покращують ріст та розвиток кореневої системи культурних рослин. Визначено, що на сьогодні існує достатня кількість агрегатів для внесення мінеральних добрив у ґрунт за різними способами та технологіями і найбільш високою продуктивністю відзначені машини, що застосовуються за технологією поверхневого внесення. Але, в такій технології є недоліки, так як добрива нерівномірно розподіляються по поверхні ґрунту та вимиваються поживні речовини. А це є важливим показником у вирощуванні сільськогосподарських культур, тому що рівномірність внесення добрив впливає на нормальний ріст і розвиток рослин, а в подальшому на врожайність. Щоб отримати хороший вплив добрив на рослини, нами запропоновано вносити добрива ярусно в ґрунт. Для такої технології наведено удосконалену конструкцію робочого органу для внесення добрив. За результатами досліджень визначено, що запропоноване розміщення плоскорізальних лоп на стійці культиватора-удобрювача дозволяє ярусно вносити добрива та рівномірно розподіляти їх по всій ширині захвату робочих органів. При цьому, пропонується вносити добрива у ґрунт пошарово, на різні глибини у два або три шари. При двошарових технологіях внесення мінеральних добрив витрати на практичне виконання машинами, можуть бути знижені на третину, а конструктивне рішення її може бути більш спрощеним. Перевагою даного технічного рішення є те, що окрім якісного рівномірного розподілення добрив у ґрунті, за допомогою запропонованої конструкції робочих органів зменшується їх тяговий опір, немає розвальних борозен і високих гребенів.*

**Ключові слова:** робочі органи, ярусне внутрішньогрунтове внесення, мінеральні добрива, культиватор-удобрювач, агрегати.

**Постановка проблеми.** Ефективність вирощування сільськогосподарських культур забезпечується за рахунок впровадження нових технологій, способів організації праці та розвитку агрохімії. Одним із факторів, що впливають на зростання обсягів виробництва сільськогосподарських культур є родючість ґрунту. Тому, основною задачею багатьох країн є покращення родючості ґрунту. Для росту рослин необхідні: вода, світло і поживні речовини, які знаходяться в ґрунті, але їх може бути недостатньо, отже потрібне використання різних мінеральних добрив.

Огляд використання сільськогосподарської техніки показав, що на ринку відсутня техніка для внутрішньогрунтового ярусного внесення мінеральних добрив під зернові культури. На сьогодні використовується техніка та технології не в повній мірі виконують агротехнічні вимоги відносно рівномірності висіву добрив [2, с. 13].

При мінімальній і нульовій технологіях посіву зернових культур відсутній технологічний процес внесення основної дози мінеральних добрив. Це призводить до зниження вмісту поживних речовин в шарі ґрунту, в якому знаходиться коренева система культурних рослин, та його ущільнення. Багаточисленні дослідження показали, що із збільшення щільності ґрунту в порівнянні з оптимальним на 0,1–0,3 г/см<sup>3</sup>, призводить до зниження урожайності на 20–40 %. Також встановлено, що наявність і вміст поживних речовин по горизонтах ґрунту відрізняються та убувають із збільшенням глибини [4, с. 12].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вирішенню питань, що пов'язані з удосконаленням технічних засобів для внесення мінеральних добрив присвячені роботи В.В. Гамаюнова [1, с. 234], О.А. Коваленка [1, с. 236], В.В. Медведєва [3, с. 89], О.П. Непочатова [3, с. 100],

В.М. Сало [2, с. 14] та ін. У зв'язку із тим, що на сьогодні немає технічних засобів для внутрішньогрунтового ярусного внесення основної дози мінеральних добрив виникає потреба у розробці такого робочого органу. Тому, дана проблема є актуальною та має важливе значення для розвитку аграрного сектору країни.

**Постановка завдання.** Мета роботи полягає в проведенні досліджень щодо існуючих способів і технічних засобів для внесення мінеральних добрив та удосконалення робочого органу для внутрішньогрунтового ярусного їх внесення.

**Виклад основного матеріалу.** Високі врожаї зернових культур можливі за умови забезпечення їх повноцінним підживленням. Для розвитку та зростання рослин необхідні світло, тепло, вода та поживні речовини. У складі культур міститься близько 70 хімічних елементів. Головні серед них вуглець, кисень та водень. Наступними за значимістю для рослин елементами є азот, фосфор та калій. Забезпечення сільськогосподарських культур елементами поживних речовин відповідно до їх біологічних потреб у певних ґрунтово-кліматичних умовах потребує застосування різних способів внесення добрив [9; 10].

На сьогодні існують такі способи внесення добрив, це: поверхневий, розкидний (суцільний), поверхнево-локальний, внутрішньогрунтовий, локально внутрішньогрунтовий [5].

Провівши дослідження можна виділити основні фактори, згідно з якими локальний спосіб внесення добрив має переваги:

- добрива, внесені в 1,5–2 рази глибше за глибину посіву насіння, що знаходяться в зоні гарантованого зволоження, швидше перехоплюються кореневими системами і тривалий час засвоюються рослинами;

- зменшення площі контакту фосфорних добрив із ґрунтом підвищує рухливість фосфатів та доступність їх до рослин.

Локальне внесення добрив в порівнянні з розкидним значно підвищує рівень їх використання: азоту – на 10–15 %, фосфору – на 5–10 %, кальцію – на 10–12 %, та створює передумови для зниження норми їх внесення на 25–30 % [2].

Локальне внесення добрив дозволяє збільшити урожайність культур, ц/га: зернових – на 2–5 %; картоплі – на 20–50 %; овочевих, кормових та силосних – на 20–40 %; соняшнику, сої – на 2–3 %. Крім того, за такого способу внесення добрив зменшується забруднення навколишнього природного середовища [2].

Ефективність цього способу значною мірою залежить від наступних факторів: рівня родючості ґрунтів, їх гранулометричного складу, вологозабезпеченості, біологічних особливостей культур, форм, видів та норм добрив, параметрів розміщення їх у ґрунті, тощо. Ефективність локалізації різко зростає при: застосуванні знижених доз добрив; завчасне внесення добрив (особливо восени) в нестійкому режимі зволоження; наявності у ґрунті рослинних залишків; підвищеної засміченості полів. Проте, систематичне щорічне стрічкове внесення середніх і високих норм добрив знижує їх результативність [2].

Особливе значення при локальному внутрішньогрунтовому внесенні має глибина загортання добрив. Наукові дослідження, проведені в різних зональних ґрунтах, встановили, що в залежності від виду сільськогосподарських культур глибина загортання добрив варіює в межах від 5–6 до 15–20 см, при цьому ґрунтовий прошарок між насінням і добривами становить 2–7 см.

Локальне внутрішньогрунтове розташування добрив нижче насіння сприяє більш інтенсивному розвитку кореневої системи та глибокому їх проникненню в нижчі шари ґрунту.

У різних країнах світу існують свої технології внесення добрива. Так, у Швеції встановлено рівнозначну ефективність розташування стрічки добрив при посіві зернових культур у кожне міжряддя та через міжряддя, що дозволяє вдвічі скоротити кількість тукових сошників, зменшити тяговий опір та металомісткість сівалки [6].

У Великобританії для культур з широкорядним посівом дотримуються схеми розташування стрічки мінеральних добрив на відстані 5 см з боку рядка рослин і на 2,5 см глибше за них.

У Німеччині після багаторічних дослідів внесення добрив під кукурудзу дійшли висновку про доцільність розташування стрічки добрив на 5 см у бік та в глибину від ряду рослин, що дало збільшення врожаю зерна порівняно з поверхневим внесенням 7,9 ц/га.

Якщо безпосередньо розглядати заводи виробники машин та обладнання для внесення добрив, то на свою увагу заслуговує фірма Vaderstad. Компанія пропонує технологію посіву з мінімальним обробітком ґрунту та різними схемами взаємного розташування насіння та добрив (рис. 1) [7].

При першій, мінеральні добрива закладають у ряд між двома рядами насіння на відстані від насіння 6–7 см і глибиною внесення на 2–3 см нижче за рівень загортання насіння. При другій, мінеральні добрива вносять у стрічки на гли-

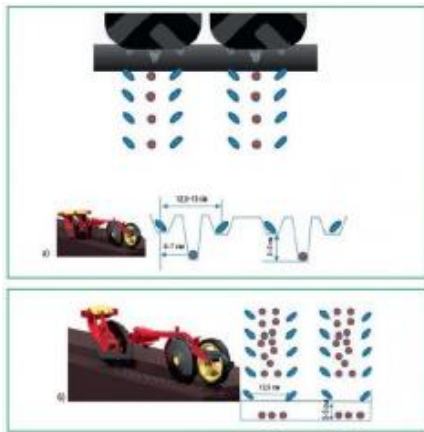


Рис. 1. Технологія внесення добрив фірми Vaderstad



Рис. 2. Сівалка марки Rapid з висівними системами Spirit 400С



Рис. 3. Глибокорозпушувач ГРС 2.0



Рис. 4. Лапа глибокорозпушувача ГРС 2.0

бину 2–3 см нижче за рівень посіву між рядками насіння, закладають з міжрядною відстанню 12,5 см. Зазначену технологію реалізують механічними сівалками марки Rapid та сівалками з централізованими пневмомеханічними висівними системами Spirit 400С (рис. 2).

Сівалка – напівпричіпна. На центральній рамі встановлені комбінований бункер для насіння та добрив, дозатори, вентилятор та пневмопроводи з двома розподільними головками. Одна з них розподіляє добрива, які по тукопроводах транспортуються стисненим повітрям під диски дворядного дискатора, який суцільно обробляє ґрунт на глибину від 3 до 6 см. За дискатором йдуть пневматичні колеса, які ущільнюють розпушений дискатором ґрунт і готують посівне ложе з потрібною щільністю ґрунту 9–11 г/см<sup>3</sup>.

Недоліками цієї технології є те, що добрива перебувають на поверхневому шарі ґрунту 3–6 см тому, поживні речовини можуть вимиватися і переміщатися в результаті водної або вітрової дифузії.

Певні досягнення у виробництві техніки для внесення мінеральних добрив є й у нашій країні. Наприклад, українська компанія з міста Одеса «Велес-Агро», розробила додаткову функцію комплектації глибокорозпушувача, систему глибокого внесення добрив, одночасно при обробі ґрунту (рис. 3) [8].

Дана функція дозволяє робити внесення гранульованих мінеральних добрив з регулюванням глибини загортання 250×400 мм. Таке внесення дозволяє рослинам у середній фазі свого розвитку розвивати кореневу систему на глибину залягання добрив.

При внесенні добрив глибокорозпушувачем коренева система рослин розвивається на глибину 250х400 мм, що дозволяє їм набагато краще переносити період посухи, оскільки на такій глибині волога зберігається довше (рис. 4).

Недоліками даної техніки є те, що на сошнику (рис. 4) патрубкі та тукопровід перебувають на вразливому місці. При заглибленні в землю на відстань до 45 см, є висока ймовірність потрапити на камінь або твердий шар ґрунту, що призведе до деформації патрубків та тукопроводу, який сприятиме порушенню рівномірності висіву гранульованих мінеральних добрив у ґрунт.

На сьогодні не існує робочих органів, які зможуть покращувати родючість ґрунту та здатні виконати внутрішньогрунтове ярусне внесення мінеральних добрив. За принципом дії всі існуючі робочі органи для внутрішньогрунтового внесення мінеральних добрив можна розділити на три групи:



– робочі органи з пасивними розкидачами із використанням енергії вільного падіння матеріалу, що висівається;

– робочі органи з активними розкидачами із використанням додаткового потоку енергій (трактора, тощо);

– робочі органи з пневморозкидачами.

Робочі органи, обладнані пасивними розкидачами, є найпростішими, надійнішими та універсальними. Розсів матеріалу заснований на принципі вільного вертикального падіння частинок мінерального добрива, і вільного польоту в просторі, утвореному черевиком плоскорізальної лапи і дном борозни [3, с. 87].

Існуючі робочі органи для внутрішньогрунтового внесення добрив не дозволяють ярусно вносити добрива та розподіляти їх по всій ширині захвату робочих органів. Тому, нами запропоновано удосконалену конструкцію робочого органу, який буде виконувати таке внесення добрив.

При внутрішньогрунтовому внесенні добрив водоспоживання рослин на одиницю продукції знизиться до 15 %. У зв'язку з цим таке внесення добрив слід вважати основним технологічним прийомом у стабілізації виробництва зерна в посушливих та напівпосушливих регіонах [4, с. 12]. При цьому, пропонується вносити добрива у ґрунт пошарово, на різні глибини у два або три шари.

При двошарових технологіях внесення мінеральних добрив витрати на практичне виконання машинами можуть бути знижені на третину, а конструктивне рішення її може бути більш спрощеним.

При ярусному внесенні мінеральних добрив у ґрунт можливі кілька варіантів розміщення плоскорізальних лап на стійці (рис. 5). На рис. 5, а) верхня лапа порівняно з нижньою зсунута назад.

Особливістю такого компоновання робочого органу є ефект затискання шару ґрунту, що розміщується нижньою лапою. Пояснюється це тим, що шар ґрунту, відірваний нижньою лапою, швидко зустрічається з верхнім, ще недоторканим горизонтом і верхньою лапою, які надають йому суттєву протидію. На наступному етапі розпушений шар ґрунту намагається втиснутися в проміжок між верхньою та нижньою лапами. Для цього йому необхідно знову стискатися до товщини, меншої за його початкову, так як відстань між лапами по вертикалі менша за товщину деформованого шару ґрунту. При цьому тяговий опір робочого органу інтенсивно посилиться, на обробленій поверхні поля з'являться великі розвальні борозни та високі гребені.

У зв'язку з вище викладеним пропонується компоновання робочого органу, представлено рис. 5, б). У цьому варіанті нижня лапа зсунута по відношенню до верхньої назад на відстань  $\delta$ . Лінія руйнування шару ґрунту нижньою лапою на півдорозі до верхньої поверхні зустрічається з лінією, вже пройденої підошви верхньої лапи, а вище – вже розпушений ґрунт. Також шар ґрунту, відірваний нижньою лапою, не буде нікуди втискатися, тому що зверху вже розпушений верхньою лапою шар ґрунту. В результаті викладеного, тяговий опір робочого органу суттєво знизиться, розвальних борозен і високих гребенів має бути менше, тому, що нижня частина стійки, що має нахил назад, не підніматиме пухкий ґрунт вгору, навпаки, опускатиме його вниз.

Ескіз експериментального робочого органу наведено на рис. 6 та культиватора-удобрювача – на рис. 7.

Експериментальний культиватор-удобрювач складається з рами 1 з опорними колесами 2 і котками 3. На рамі зверху встановлений бункера 4

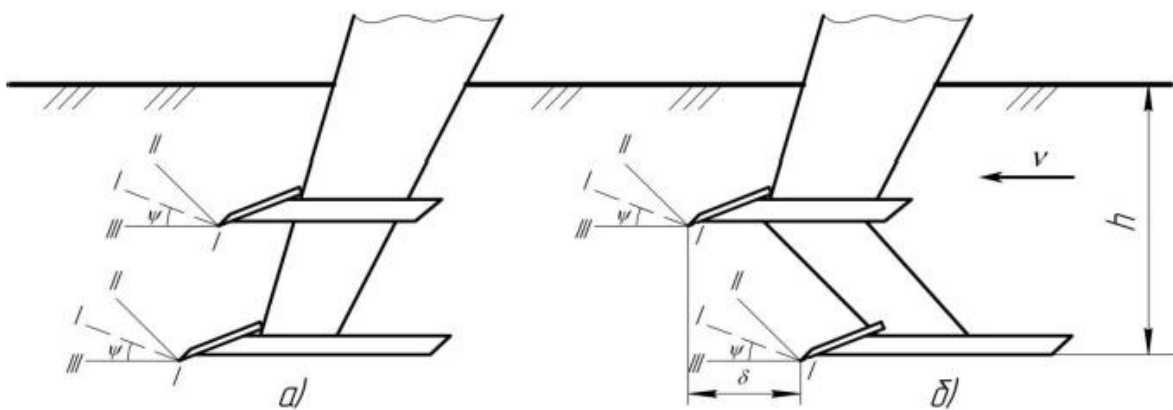


Рис. 5. Двошарове компоновання ґрунтообробного робочого органу

для насіння та добрив з тукопроводом 5. На рамі знизу встановлені експериментальні 2-х ярусні робочі органи 6 та гідравлічні циліндри 7 горизонтальний лінійний актуатор 8 безступінчастий редуктор 9.



Рис. 6. Модель експериментального робочого органу

Експериментальний зразок культиватор-удобрювач працює з системою точного землеробства та забезпечує внесення мінеральних добрив тільки в тих ділянках, які зазнають нестачі хімічних елементів, таких як фосфор Р, азот N, калій К й ін.

**Висновки.** Таким чином, із вище викладеного можна зробити висновки, що удосконалення робочого органу для внутрішньогрунтового ярусного внесення мінеральних добрив в сучасному виробництві є досить перспективним. Такі агрегати мають ряд переваг, а саме рівномірне розподілення добрив у різних шарах ґрунту, що сприяють хорошему росту й розвитку рослин. При цьому, відбувається менше шкідливих викидів в атмосферу та вимивання поживних речовин. Що стосується конструктивних переваг, то запропоноване розміщення плоскорізальних лап на стійці призводить до зменшення тягового опору робочого органу, розвальних борозен та високих гребенів.

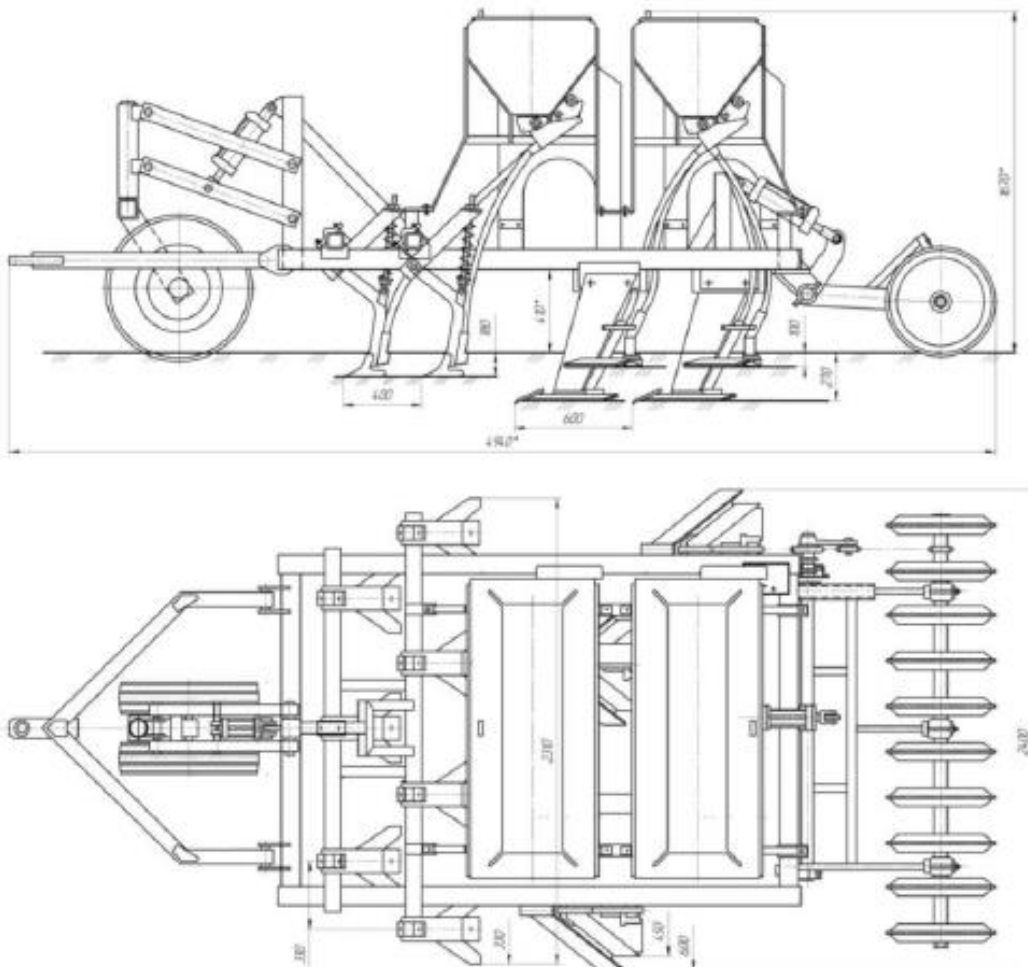


Рис. 7. Креслення експериментального зразка культиватора-удобрювача

## Список літератури:

1. Гамаюнова В.В., Коваленко О.А., Хоненко Л.Г. Сучасні підходи до ведення землеробської галузі на засадах біологізації та ресурсозбереження : колективна монографія / за редакцією П.В. Писаренка, Т.О. Чайки, І.О. Яснолоб. Полтава : ПДАА, 2018. С. 232–241.
2. Дейкун В.А., Сало В.М., Васильковський О.М. Аналіз способів внесення мінеральних добрив. *Наукові записки*. Кіровоград, КНТУ. 2004. Вип. 5. С. 12–15.
3. Медведєв В.В. Фізичні та фізико – механічні властивості ґрунтів як основа для створення ґрунтоз-бережувальних знарядь і технологій обробітку. Міжвідомчий тематичний науковий збірник : *Агрохімія і ґрунтознавство*. Харків. 2014. С. 86–106.
4. Носко Б.С., Медведєв В.В., Непочатов О.П. Роль добрив у підвищенні ефективності землеробства в посушливих умовах. *Вісник аграрної науки*. 2000. № 5. С. 11–15.
5. Способи внесення мінеральних добрив. вебсайт. URL: [http://studbooks.net/76221/agropromyshlennost/sposoby\\_vneseniya\\_mineralnyh\\_udobreniy](http://studbooks.net/76221/agropromyshlennost/sposoby_vneseniya_mineralnyh_udobreniy). (дата звернення 11.04.2024).
6. Статистика по добривах у країнах Східної Європи. вебсайт. URL: [mineralnykh-udobrenie-v-raschete-na-edinitu-zemelnoj-13.html](http://mineralnykh-udobrenie-v-raschete-na-edinitu-zemelnoj-13.html). (дата звернення 12.04.2024).
7. Техніка Vaderstad. вебсайт. URL: <https://technotorg.com/nashi-breendi/vaderstad/> (дата звернення 10.02.2024).
8. Техніка Велес-Агро. вебсайт. URL: <https://www.velesagro.com/>. (дата звернення 10.02.2024).
9. Baker J.L. A point-injector applicator to improve fertilizer management. *TRANSACTIONS of the ASAE*. 1989. V. 5. JVb3. P. 334.
10. Womak A.R. Probe-type Injector for Fluid Fertilizers. *TRANSACTIONS of the ASAE*. 1990. V. 6. № 2. P. 149.

#### Kutkovetska T.O. IMPROVEMENT OF THE WORKING ORGAN FOR INTERNAL SOIL LAYER IMPLEMENTATION MINERAL FERTILIZERS

*The article carries out theoretical studies on the existing methods, technologies and technical means for applying mineral fertilizers, and also provides the design of an improved working body for in-soil tiered application of fertilizers. As a result of the conducted research, we found that there are different ways of applying mineral fertilizers, but the local in-soil application method is the most effective, as it contributes to a better assimilation of nutrients by plants, which, as a result, improves the growth and development of the root system of cultivated plants. It was determined that today there is a sufficient number of units for applying mineral fertilizers to the soil using various methods and technologies, and the machines used using surface application technology are noted to have the highest productivity. However, this technology has drawbacks, as fertilizers are unevenly distributed over the soil surface and nutrients are washed out. And this is an important indicator in the cultivation of agricultural crops, because the uniformity of fertilizer application affects the normal growth and development of plants, and later on the yield. In order to get a good effect of fertilizers on plants, we suggest applying fertilizers in layers in the soil. For this technology, an improved design of the working body for applying fertilizers is given. Based on the results of research, it was determined that the proposed placement of flat-cutting paws on the stand of the cultivator-fertilizer allows you to apply fertilizers in rows and distribute them evenly over the entire width of the working organs. At the same time, it is suggested to apply fertilizers to the soil layer by layer, at different depths in two or three layers. With two-layer technologies of applying mineral fertilizers, the cost of practical implementation by machines can be reduced by a third, and its constructive solution can be more simplified. The advantage of this technical solution is that, in addition to high-quality uniform distribution of fertilizers in the soil, with the help of the proposed design of the working bodies, their traction resistance is reduced, there are no rolling furrows and high ridges.*

**Key words:** working bodies, tiered intrasoil application, mineral fertilizers, cultivator-fertilizer, aggregates.

## **АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА**

---

УДК 629.7.01

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.1/04>

**Бойко С.М.**

Національний університет «Запорізька політехніка»

**Котов О.Б.**

Національний університет «Запорізька політехніка»

**Ланіна О.С.**

Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ

**Реута А.В.**

Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ

**Гвоздік С.Д.**

Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ

**Дерябіна І.О.**

Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ

## **ОСОБЛИВОСТІ ОРГАНІЗАЦІЇ ЗАХОДІВ БЕЗПЕКИ В МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ТРАНСПОРТНИХ ВУЗЛАХ**

*Стаття присвячена питанням розробки рекомендацій щодо особливостей організації заходів безпеки в мультимодальних транспортних вузлах. У статті визначено основні вимоги, що пред'являються до організації безпеки на транспорті та окремо розглянуто принципи організації системи авіаційної безпеки. Акцентовано увагу на те, що система авіаційної безпеки організовується в рамках принципів ІСАО та регіональних правових аспектів, котрі регулюють діяльність цивільної авіації. Відповідно, зазначено, що авіаційний транспорт характеризується найвищим рівнем безпеки серед інших видів транспорту. У статті, зважаючи на всі зазначені аспекти, умови та чинники, запропоновано підхід щодо організації безпеки транспортних мультимодальних вузлів, враховуючи особливості взаємодії різних видів транспорту. Також, у статті за результатами досліджень доведено необхідність побудови структури системи безпеки транспортних мультимодальних вузлів за принципом організації служби авіаційної безпеки. Між тим, з метою вдосконалення рівнів безпеки транспортних вузлів рекомендовано застосовувати сучасні електронні системи та пристрої. Слід зазначити, що якщо в мультимодальному вузлі не передбачена взаємодія в авіаційним транспортом, то заходи безпеки на рівні авіаційної безпеки не обов'язкові, що спростить процедуру взаємодії видів транспорту. Між тим, рівень безпеки в мультимодальному вузлі має бути на високому рівні, з метою забезпечення ефективності, надійності та безпеки взаємодії різних видів транспорту. Стаття присвячена питанням вдосконалення організації існуючих та проектування роботи нових транспортних мультимодальних вузлів з урахуванням аспектів взаємодії різних видів транспорту та підтримання належного рівня безпеки при функціонуванні відповідних транспортних вузлів. Запропоновано при організації мультимодальних вузлів, підтримувати достатньо високий рівень безпеки, в той же час при взаємодії з авіаційним транспортом, рівень безпековий рівень організовувати накітталт організації системи авіаційної безпеки аеропортів, із залученням сучасних електронних пристроїв та засобів контролю. Такий підхід дасть можливість підвищити безпеку транспортних перевезень вцілому та допоможе в організації взаємодії з іншими видами транспорту.*

**Ключові слова:** транспортний мультимодальний вузол, аеропорт, безпека на транспорті, авіаційна безпека, транспортна система.

**Постановка проблеми.** На сьогоднішній день відбувається активний розвиток транспортної галузі у світовому масштабі. Особливо це помітно у розвинених країнах світу. Основними принципами розвитку транспортної галузі є швидкість та безпечність доставки вантажу чи пасажирів до необхідного місця, при цьому важливим залишається комфорт пасажирів та збереженість і цілісність вантажу. Відповідно до вказаних принципів розвитку транспортної системи сформувався підхід до поєднання різних видів транспорту.

Слід зауважити, що авіаційно-транспортна система (АТС) що складається з множини компонентів (повітряне судно, екіпаж, служба підготовки та забезпечення польоту, служба управління повітряним рухом (УПР), а також фактори, які впливають на неї, такі як погодні, правові, психологічні та ін.), в порівнянні з іншими видами транспорту, найбільше приділяє уваги безпеці, що проявляється у безпеці польотів та авіаційній безпеці.

Тож, для якісного забезпечення безпеки транспортних мультимодальних вузлів слід у їх межах підвищувати рівень безпеки перевезень котрий буде наближений по ряду параметрів до рівня авіаційної безпеки. Таким чином, актуальним є вивчення функціонування транспортних мультимодальних вузлів особливо у аспекті безпеки перевезень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Зважаючи на аспекти міжнародно-правових засад регулювання відносин у сфері цивільної авіації [1, с. 280–281], правил та принципів організації функціонування цивільної авіації ІКАО [2] та Повітряного кодексу України [3] рівень авіаційної безпеки у галузі цивільної авіації має достатньо високий рівень та постійно покращується.

Між тим, на сьогоднішній день, з метою підвищення ефективності транспортних перевезень перш за все в аспекті зменшення термінів доставки вантажів та пасажирів, у світі активно впроваджуються мультимодальні транспортні вузли [4, с. 114–118]. Україна в свою чергу, на шляху до реформування та модернізації транспортної системи [5, с. 50–118].

Використовуючи міжнародний досвід організації транспортних мультимодальних вузлів [6, с. 1–15] та сучасні концепції розвитку авіаційних транспортних систем [7, с. 107–120] було проаналізовано особливості розвитку транспортної системи України та визначено потенціал розвитку та напрямки модернізації транспортної системи [8, с. 48–63].

Між тим, питання забезпечення безпеки функціонування мультимодальних транспортних вуз-

лів залишається відкритим і потребує подальшого дослідження.

**Постановка завдання.** Метою статті є розробка рекомендацій щодо особливостей організації заходів безпеки в мультимодальних транспортних вузлах.

**Виклад основного матеріалу.** Враховуючи той факт, що авіаційний транспорт характеризується найвищим рівнем безпеки серед інших видів транспорту, розглянемо його принципи побудови системи безпеки та заходи щодо його підтримання.

Структура АТС включає в себе такі основні елементи: транспортний вузол, рух комунікаціями, перевезення повітряною трасою, УПР, рух комунікаціями аеропорту; комунікацій аеропорту, системи УПР до прийняття ПС, підтримки готовності (життєздатності) повітряних суден (ресурсозабезпечення) з елементами підтримки транспортного вузла і транспортної компанії, комунікацій аеропорту, комунікацій і системи УПР.

Авіаційна галузь є однією із сучасних та перспективних галузей транспорту будь-якої країни світу. Специфіка функціонування авіаційної галузі орієнтована на підтримання максимального рівня безпеки експлуатації авіаційного транспорту та безпечного перевезення пасажирів. Завданнями забезпечення безпеки у цивільній авіації, відповідно до міжнародних нормативних документів, займається служба авіаційної безпеки. Одна з основних задач служби авіаційної безпеки в аеропорту є пошук та виявлення вибухових речовин та вибухових пристроїв, зброї та боєприпасів – і, перш за все, для запобігання терористичним актам, так як цивільна авіація є привабливою сферою для скоєння терористичних дій, приваблюючи злочинців своєю масштабністю. Для вирішення даної задачі застосовують спеціальні технічні заходи (використання спеціальних технічних засобів контролю), фізичні ресурси (персонал служби авіаційної безпеки) та законодавчі заходи (нормативно-правова база глобального, регіонального та національного рівнів).

Зони аеропорту поділяються на контрольовану зону, зону обмеженого доступу, що охороняється, стерильну зону, критичні ділянки зон обмеженого доступу, котрі охороняються.

Існують основні схеми розташування пунктів контролю на авіаційну безпеку, а саме на вході в зал очікування (рис. 1), при виході на посадку (рис. 2), при вході до посадкової галереї (рис. 3).

Пасажири, котрі відлітають, проходять централізовану реєстрацію на рейс та проходять від-



Рис. 1. Пункт контролю на АБ при вході у стерильну зону



Рис. 2. Пункт контролю на АБ при вході до посадкової галереї



Рис. 3. Пункт контролю на АБ при виході на посадку

повідним коридором. Багаж вилітаючих пасажирів централізовано збирається на центральному пункті реєстрації та прямує в приміщення сортування багажу, звідки він перевозиться до відповідного повітряного судна. Прибулі пасажирів і багаж обслуговуються в зворотному порядку. Тож в системі авіаційної безпеки аеропортів передбачено централізацію взаємодії персоналу авіакомпаній і керівництва аеропорту, можливість централізації комплексу сподуд та приміщень аеропорту, можливість використання достатньо простих інформаційних систем, забезпечується контроль за пасажирами та багажем, за необхідності проводиться вибірковий ретельний контроль.

Пошук і виявлення речовин і пристроїв доводиться проводити в різних умовах – при огляді пасажирів в аеропортах та інших місцях масового

скупчення людей, при прийомі багажу, ручної поклажі та поштових відправлень, при контролі транспортних засобів, контейнерів, продуктів харчування, сипких вантажів. Доглядове обладнання також застосовується для виявлення спроб нелегального проникнення на територію чи перевезення заборонених предметів, контрабанди та наркотиків, тобто для забезпечення економічної безпеки країни та здоров'я її громадян.

Одним із основних і важливих елементів сучасного пункту догляду в аеропорту є рентгено-телевізійний інтроскоп. Сучасні рентгено-телевізійні установки, зазвичай, комп'ютеризовані, що дозволяє виконати дослідження багажу чи ручної поклажі шляхом короточасного опромінення. Слід зауважити, що з точки зору ефективності та точності контролю інтроскопи перевершують усі інші існуючі варіанти техніки. Тож, сучасні системи рентгеновського контролю за кілька секунд здатні вивести на екран повну проекцію внутрішнього простору валізи, рюкзака або сумки, включаючи потайні та приховані відділення, виявити вогнепальну зброю, складові елементи зброї, боеприпаси, колючо-ріжучу предмети, вибухові речовини (це якщо РТІ зі встроєним датчиком вибухових речовин, рідини (скоріш **об'єм** рідин, та інші заборонені предмети та речовини при перевезенні транспортуванні авіаційним транспортом (відповідно Додаток 4 до Авіаційних правил України «Інструкція з організації та здійснення контролю на безпеку в аеропортах України» № 322).

Виявлення небезпечних речовин і пристроїв відбувається на основі аналізу рентгеновського випромінювання, що пройшло або назад розсіяного. Все частіше у цих установках використовується принцип реєстрації рентгеновського випромінювання у двох галузях енергетичного спектру (dual energy X-ray transmission system), і навіть комп'ютерна томографія отримання та аналізу зображення контрольованих предметів. Спектр рентгено-телевізійних установок, що випускаються, стаціонарних і мобільних, дуже широкий і вони адаптовані для найрізноманітніших умов застосування. Варто наголосити, що нещодавно з'явилося кілька «низкодозних» рентгено-телевізійних установок (РТІ) (з м'яким рентгеновським випромінюванням) для огляду людей.

Серед переваг застосування РТІ під час контролю на авіаційну безпеку можна відзначити: можливість отримання двовимірних та трьох-вимірних зображень; кольорову інтерпретацію в залежності від щільності досліджуваного предмету; можливість ідентифікації вогнепальної

зброї (та її складових), боєприпасів, холодної зброї, вибухових речовин, органічних речовин; мінімальний час догляду одного об'єкта завдяки автоматизації процесу; можливість безперебійної експлуатації установки впродовж довгого часу; безпечність інтроскопа для експлуатанта та пасажирів; широкий спектр габаритних розмірів, що дозволяє сканувати як ручну поклажу так багаж, вантаж та поштові відправлення великих розмірів та об'ємів; швидкий термін навчання для роботи з даним обладнанням.

Основним недоліком рентгенотелевізійного обладнання є відсутність автоматичного виявлення зброї, вибухових пристроїв, небезпечних предметів і речовин. Хоча сучасні РТІ оснащені системами підтримки уваги оператора (випадкове встановлення загроз у знімках для концентрування уваги оператора) та системами автоматичного виявлення небезпечних та заборонених предметів (підсвітка щільної зони зображення, як можливої загрози). Також важливим недоліком рентгенотелевізійних систем є залежність інтерпретації зображення (можливої загрози) від навичок оператора – тобто залежність якості дослідження від людського фактору.

Таким чином, відповідно до схеми розстановки персоналу в пункти догляду (ПД) на АБ (рис. 4) розподіл обов'язків між персоналом САБ наступний. Оператор, що здійснює інформування (№ 1), виконує у відповідності нормативним документам, на пунктах догляду інформує пасажирів, щодо процедури проходження контролю на АБ, перевіряє наявність та відповідність документів, що засвідчує особу пасажирів, авіаквиток та посадковий талон, регулює пасажиропотік. Оператор, що працює з РТІ (№ 2) виконує контроль ручної поклажі та багажу за допомогою рентгенотелевізійної установки, інтерпритує зображення на екрані, встановлює необхідність проведення ручного догляду речей за допомогою ручного догляду або із застосуванням ДВР (детектора вибухових речовин) та здійснюється 10 % ручний контроль ручної поклажі та багажу. Оператор, що працює зручною поклажею (№ 3) у присутності пасажирів проводиться контроль вмісту ручної поклажі та багажу на підставі рішення прийнятого оператором РТІ (№ 2), здійснює вибірковий ручний догляд ручної поклажі відповідно до існуючого рівня загрози. Оператор, що працює з СМШ (стаціонарним метало-шукачем) та РМД (ручним металодетектором) (№ 4) контролює проходження пасажирів через стаціонарний метало детектор як допоміжний засіб, може використовуватися пор-

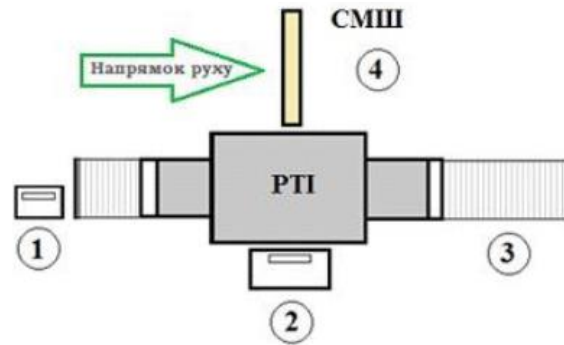


Рис. 4. Стандартна схема розстановки персоналу в ПД на АБ

тативний металодетектор. Зазначений розподіл обов'язків між співробітниками САБ дає можливість забезпечити належний високий рівень безпеки.

Слід зауважити, що догляд пасажирів і їх ручної поклажі має на меті попередження проносу на борт повітряного судна зброї, вибухових засобів або інших небезпечних пристроїв та заборонених засобів, котрі можуть бути використані для здійснення незаконного втручання у функціонування аеропорту.

В свою чергу, слід зауважити, що авіаційний транспорт характеризується посиленими заходами безпеки. Тож, при взаємодії авіаційного з іншими видами транспорту необхідно передбачити сумісні заходи безпеки, котрі не будуть знижувати рівень авіаційної безпеки. Варіантом запропонованим авторами, є використання безпечових заходів авіаційного транспорту в умовах мультимодального вузла, за умови за діяння у перевезенні пасажирів чи вантажів з використання авіаційного транспорту. Такий підхід дасть можливість підвищити безпеку транспортних перевезень в цілому та допоможе в організації взаємодії з іншими видами транспорту.

Між тим, слід зазначити, якщо в мультимодальному вузлі не передбачена взаємодія в авіаційним транспортом, то заходи безпеки на рівні авіаційної безпеки не обов'язкові, що спростить процедуру взаємодії видів транспорту. Але при цьому, рівень безпеки в мультимодальному вузлі має бути на високому рівні, з метою забезпечення ефективності, надійності та безпеки взаємодії різних видів транспорту.

**Висновки:**

1. Враховуючи актуальність та необхідність розвитку малої авіації України та налагодження взаємодії різних типів транспорту, шляхом організації мультимодальних транспортних вузлів, слід

звернути увагу на безпеку функціонування мультимодальних вузлів, як транспортних комплексів.

2. Запропоновано при організації мультимодальних вузлів, підтримувати достатньо високий рівень безпеки, в той же час при взаємодії з авіа-

ційним транспортом, рівень безпековий рівень організувати нахталт організації системи авіаційної безпеки аеропортів, із залученням сучасних електронних пристроїв та засобів контролю.

#### Список літератури:

1. Григоров О.М. Міжнародно-правові засади регулювання відносин у сфері цивільної авіації: становлення та розвиток : монографія. Одеса : Фенікс, 2020. С. 280–281.
2. ICAO Strategic Objectives [Електронний ресурс]. URL: <http://www.icao.int/about-icao/Pages/Strategic-Objectives>.
3. Повітряний кодекс України [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3393-17#Text> (дата звернення: 27.05.2024).
4. Соколова О. Є. Концептуальні засади формування мультимодальної системи перевезення вантажів. *Наукоємні технології*. 2014. № 1. С. 114–118.
5. Крихтіна Ю. О. Державна політика розвитку транспортної галузі України: теорія, методологія, практика : монографія. Харків : Діса плюс, 2022. 336 с.
6. Steadie Seifi M., Dellaert N. P., Nuijten W., Van Woensel T., & Raoufi R. Multimodal freight transportation planning: A literature review. *European Journal of Operational Research*. 2014. № 233 (1). P. 1–15.
7. Airport engineering: planning, design and development of 21st century airports / Norman J. Ashford, SalehMumayiz, Paul H. Wright. 4th edition. 2011. 769 p.
8. Kotov O., Obidin D., Boiko S., Pavlovskiy M., Nozhnova M. The Problems of Ensuring the Efficiency and Competitiveness of the Ukrainian Transport Industry to Meet the Modern Challenges and Threats Khazar. *Journal of Humanities and Social Sciences (Special Issue)*. 2023. Vol. 26. № 3. P. 48–63.

#### **Boiko S.M., Kotov O.B., Lapina O.S., Reuta A.V., Gvozdik S.D., Derybina I.O. FEATURES OF THE ORGANIZATION OF SECURITY MEASURES AT MULTIMODAL TRANSPORT NODES**

*The article is devoted to issues of development of recommendations regarding the peculiarities of the organization of security measures in multimodal transport hubs. The article defines the main requirements for the organization of transport security and separately considers the principles of the organization of the aviation security system. Attention is focused on the fact that the aviation security system is organized within the framework of ISAO principles and regional legal aspects that regulate the activities of civil aviation. Accordingly, it is stated that air transport is characterized by the highest level of safety among other types of transport. In the article, taking into account all the mentioned aspects, conditions and factors, an approach to the organization of the security of multimodal transport nodes is proposed, taking into account the peculiarities of the interaction of different types of transport. Also, based on the results of the research, the article proves the necessity of building the structure of the security system of multimodal transport hubs based on the principle of organizing the aviation security service. Meanwhile, in order to improve the security levels of transport hubs, it is recommended to use modern electronic systems and devices. It should be noted that if the multimodal node does not provide for interaction in air transport, then security measures at the level of aviation security are not mandatory, which will simplify the procedure for interaction between modes of transport. Meanwhile, the level of security in a multimodal node should be at a high level, in order to ensure the efficiency, reliability and safety of the interaction of different types of transport. The article is devoted to issues of improving the organization of existing and designing the operation of new transport multimodal hubs, taking into account the aspects of the interaction of different types of transport and maintaining the appropriate level of safety during the operation of the relevant transport hubs. It is suggested that when organizing multimodal hubs, maintain a sufficiently high level of security, at the same time when interacting with air transport, the level of security should be organized similar to the organization of the aviation security system of airports, with the involvement of modern electronic devices and means of control. This approach will make it possible to increase the safety of transportation as a whole and help in the organization of interaction with other modes of transport.*

**Key words:** transport multimodal hub, airport, transport security, aviation security, transport system.



## **ЕЛЕКТРОНІКА**

УДК 621.791.725

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.1/05>

**Бернацький А.В.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Набок Т.М.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Юрченко Ю.В.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Сіора О.В.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Соколовський М.В.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Бондарєва В.І.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Лукашенко В.А.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Данилейко О.О.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України,  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### **ВИКОРИСТАННЯ ФОТОЕЛЕКТРОННОГО ПОМНОЖУВАЧА ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ПРОЦЕСУ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ**

*З розвитком технологій лазерного зварювання постало завдання контролю процесу зварювання. Для цього використовуються різні системи та методи моніторингу. Останні дослідження показують, що існує чіткий взаємозв'язок між режимом процесу лазерного зварювання та зареєстрованими сигналами, що дозволяє виявляти дефекти на ранніх стадіях. Однак, через високу вартість та низьку точність датчиків, ці методи не були широко застосовані в промисловості раніше. Сучасні розробки у сфері сенсорних технологій і штучного інтелекту значно покращили можливості моніторингу. Зниження вартості лазерної техніки сприяє більш широкому застосуванню лазерних технологій у промисловості, де моніторинг в режимі реального часу може знизити витрати і підвищити якість продукції. Основна увага приділяється оптичному випромінюванню в зоні зварювання, для чого використовуються оптичні датчики. Стаття присвячена створенню макетного зразка системи моніторингу процесу лазерного зварювання на основі фотодатчика. Найпоширенішими для таких завдань є напівпровідникові фотоелементи, але через їхню високу чутливість до інфрачервоного випромінювання, вони не можуть ефективно використовуватися для моніторингу процесу лазерного зварювання. Натомість вакуумні фотоелементи, такі як фотоелектронний помножувач «ФЕУ-35», виявилися більш придатними завдяки своїй спектральній чутливості в діапазоні 300–600 нм і можливості використання оптичних фільтрів для послаблення інфрачервоного випромінювання. Вакуумний фотоелектронний помножувач дозволяє фіксувати відхилення інтенсивності світлення факелу під час зварювання, що сигналізує про можливі дефекти у зварному з'єднанні. При змінах інтенсивності світлення фотоелемент генерує сигнал до 35 мА, що може бути зафіксовано цифровим осцилографом RIGOL. Отримані дані можна зберігати в пам'яті осцилографа або передавати на персональний комп'ютер для подальшої обробки за допомогою програмного забезпечення, такого як Microsoft Office EXCEL. Запропоновано систему*

моніторингу, що є перспективною для інтеграції у виробничі процеси, оскільки дозволяє здійснювати високоточний контроль за процесом лазерного зварювання у режимі реального часу.

**Ключові слова:** лазерне зварювання, моніторинг, напівпровідниковий фотоелемент, датчик, електрична схема, макет, аналоговий сигнал.

**Постановка проблеми.** Лазерне зварювання широко використовується в різних промислових областях, таких як автомобілебудування, суднобудування і будівництво мостів завдяки її перевагам і реалізуючи високу продуктивність, автоматичну обробку і формування високоякісного зварного шва з малим розміром зони термічного впливу (ЗТВ) [1; 2]. Тому онлайн моніторинг і якість перевірки лазерного зварювання має важливе значення для виготовлення високоякісної продукції. Досить багато вчених ще двадцять років тому проводили дослідження з детектування в процесі лазерного зварювання [3–5].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз наукових праць за вказаною тематикою показує, що існує взаємозв'язок між режимом технологічного процесу лазерного зварювання та зареєстрованими сигналами і що такий зв'язок проявляє себе в більшій або меншій ступені незалежно від методу дослідження [6]. Достовірність обробки та розпізнавання сигналів залежить в першу чергу від методу, що враховує розподіл та взаємний зв'язок інформативних ознак в сигналі [7; 8]. Однак експериментальні результати не були широко застосовані в промислове виробництво в той час, через значну вартість датчиків, низької точності приладів і поганій ефективності виявлення. Кількість підприємств, які використовували лазер для обробки продукції, тоді була невелика, це вважається ще одним важливим фактором, який обмежував подальший розвиток процесу моніторингу лазерного зварювання. Оскільки ціна лазерних пристроїв зараз постійно зменшується, лазерні технології починають знаходити широке застосування в промисловості. Під час масового виробництва, в режимі реального часу моніторинг процесу зварювання може допомогти зменшити собівартість і поліпшити якість продукції.



Рис. 1. Фотоелектронний помножувач «ФЕУ-35»

Лазерне зварювання в основному передбачає взаємодію між лазерним променем і зварювальним матеріалом. У зварювальному процесі, як правило, лазерне світло проходить через оптичне волокно і лінзу. Відповідно, моніторинг процесу лазерного зварювання в реальному часі, в основному орієнтований на інформацію оптичного випромінювання в зоні зварювання, і велика частина датчиків, що використовуються в дослідженнях, є оптичними датчиками. Розробка, виявлення та реєстрація сигналів в режимі реального часу при лазерному зварюванні, за минулі десять років значно прогресували, завдяки розвитку в області сенсорних технологій і впровадженню технології штучного інтелекту.

**Постановка завдання.** Мета роботи – створення макетного зразка системи моніторингу процесу лазерного зварювання на основі фотодатчика.

**Виклад основного матеріалу.** Відомо, що суттєво спростити аналіз відео зображення одержаного під час зварювання дозволяє використання фотоелементу.

Найпоширенішим для вирішення подібної задачі у різних галузях промисловості є застосування напівпровідникових фотоелементів. Це обумовлено їх відносно невеликою вартістю та простотою вимірювальних схем. Але діапазон вимірювання більшості напівпровідникових елементів знаходиться в зоні інфрачервоного випромінювання. Тому під час лазерного зварювання вони будуть повністю засвічені і на виході буде максимальне значення фотоелектроушійної сили (ФЕРС). На фоні максимального значення ФЕРС неможливо буде розрізнити мале значення корисного сигналу. Використання же оптичних фільтрів поглине корисний сигнал. Тому застосування напівпровідникових елементів є недоцільним для вирішення поставленого завдання.

При використанні вакуумних фотоелементів, можуть бути застосовані оптичні фільтри. Тому що вони дозволяють послабити випромінювання інфрачервоного діапазону та зменшити засвічування від плазмового факелу зварювальної ванни. Це обумовлено технічними характеристиками вакуумних фотоелементів, а саме діапазоном спектральної чутливості 300–600 нм.

Аналіз технічних характеристик вакуумних фотоелементів дозволив зупинитись на фотоелектронному помножувачі «ФЕУ-35», як такого, що відповідає вищенаведеним вимогам (рис. 1), а його технічні характеристики представлені у табл. 1.

Технічні характеристики фотоелектронного помножувача «ФЕУ-35»

| ФЕУ-35А                | ФЕУ-35                                  | Тип пристрою                                                                              |
|------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
|                        | Торцеве [дюколь]                        | Розташування вихідного вікна [виводи]                                                     |
|                        | Ø25                                     | Розмір фотокаатода, мм                                                                    |
|                        | C-6 (0,3-0,6) [0,38-0,42]               | Тип спектральної характеристики ( $\Delta\lambda$ , мкм) [ $\lambda_{\text{макс}}$ , мкм] |
|                        | 8                                       | Число діодів (каскадів підсилення)                                                        |
| 45                     | 40                                      | $S_p$ , мкА/лм, не менше                                                                  |
| 10 (1200)<br>30 (1600) | 1 (700-900) 10 (1050)<br>30 (1250-1750) | $S_a$ , (при $U_p$ , В), А/лм                                                             |
|                        | $2 \cdot 10^{-2}$ (0,41 мкм)            | $S_e$ , А/Вт, не менше                                                                    |
|                        | -                                       | $S_{(0,9)}$ , А/Вт, не менше (на $\lambda$ , мкм)                                         |
| 1600                   | 1750                                    | $U_{\text{живл}}$ , В, не більше                                                          |
| $1 \cdot 10^{-8}$ (10) | $2 \cdot 10^{-8}$ (10)                  | $I_p$ , А, не більше (при $S_a$ , А/лм)                                                   |
|                        | $5 \cdot 10^{-5}$                       | $I_a$ , А, не більше                                                                      |
| 1,75 кеВ               | 1,8 кеВ                                 | $F_a$ , лм/Гц <sup>1/2</sup>                                                              |
|                        | -60...+50                               | Діапазон робочих температур, °С                                                           |
|                        | Ø30 × 109 [50]                          | Габаритні розміри корпусу, мм [маса, г], не більше                                        |

Для підключення фотоелектронного помножувача було виготовлено джерело живлення з вихідною напругою 1500 В постійного струму, яке дозволяє отримати паспортні характеристики.

На рис. 2 показана електрична принципова схема джерела живлення. Основним елементом схеми є високочастотний трансформатор TV2, який складається із багатьох вторинних обмоток, виходи яких

підключені кожна до свого мостового випрямляча VD4...VD23. З однієї секції (обмотка та випрямляч) можливо одержати напругу близько 80 В. Високочастотний трансформатор складається з 20 секцій. Усі вони з'єднані послідовно і це дозволяє одержати напругу близько 1600 В. На первинну обмотку високочастотного трансформатора подається прямокутна напруга амплітудою 60 В і частотою 30 КГц.

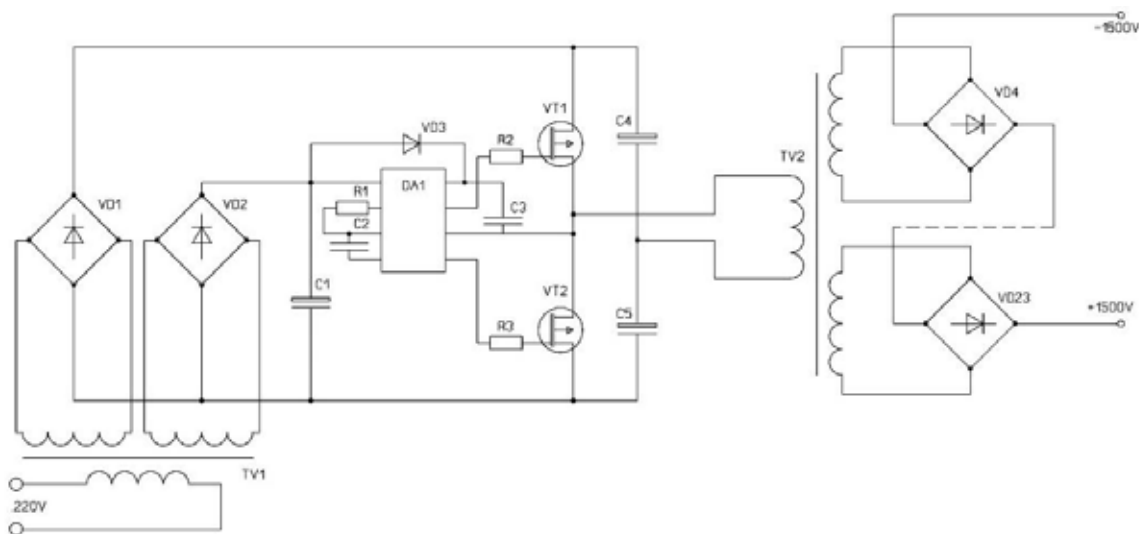
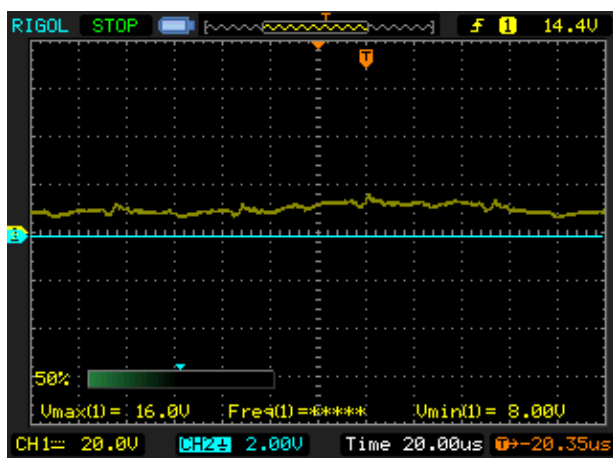


Рис. 2. Електрична принципова схема джерела живлення системи моніторингу на базі фотоелектронного помножувача «ФЕУ-35»



а



б

Рис. 3. Цифровий осцилограф “RIGOL”, що використовувався при тестуванні макету системи моніторингу на базі фотоелектронного помножувача «ФЕУ-35»

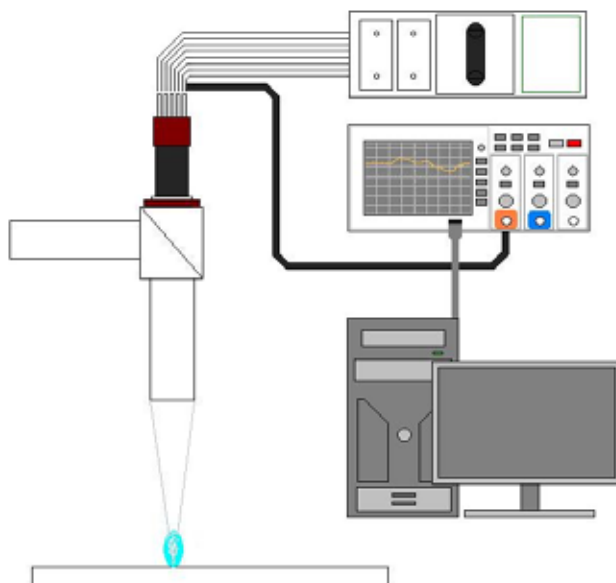


Рис. 4. Загальна схема експерименту з тестування макету системи моніторингу на базі фотоелектронного помножувача «ФЕУ-35»

Цю напругу формує напівмостовий транзисторний перетворювач. Він складається із двох високовольтних польових транзисторів VT1, VT2 N-канальної структури IRF840 та двох електролітичних конденсаторів C4, C5 ємністю 470 $\mu$ F, та напругою 200В. Сигнали для керування транзисторами формує спеціалізована інтегральна мікросхема DA1 – самотактуючий напівмостовий драйвер IR2153.

Щоб вихідна напруга джерела живлення не перевищувала рекомендованих значень, був застосований понижувальний трансформатор TV1 промислової частоти 50 Гц на обмотки якого формують напруги 56 В та 12 В. Мостові випрямлячі VD1 та VD2 роблять ці напруги постійними для правильної роботи транзисторів та мікросхеми.

Фотоелемент використовується із застосуванням оптичних фільтрів та дозволяє зафіксувати відхилення інтенсивності свічення факелу під час лазерного зварювання. За результатами вимірювання інтенсивності свічення факелу зварювальної ванни, фотоелементом формується сигнал до 35 мА. Зміна інтенсивності свічення факелу призводить до зміни величини сигналу, що дозволяє встановити факт наявності дефектів у зварному з’єднанні. При навантаженні фотоелемента активним опором 1000 Ом на ньому буде фіксуватись падіння напруги в межах 35 вольт. Цієї напруги достатньо для фіксації її цифровим осцилографом RIGOL (рис. 3,а). На рис. 3,б наведений вигляд аналогового сигналу на екрані осцилографу та вже оброблений сигнал.

Загальна схема експерименту з тестування макету системи моніторингу на базі фотоелектронного помножувача «ФЕУ-35» представлена на рис. 4.

Фотоелемент був встановлений на місце відеокамери. Аналоговий сигнал, який формує елемент, надходив на один із каналів цифрового осцилографа. Налаштування осцилографа та вимірювального щупа дозволяють проводити вимірювання сигналу амплітудою до 30 вольт і на часовому відрізку, сумірним із часом протіканням зварювання. Корисний сигнал можливо залишити як у пам’яті цифрового осцилографа, так і передати по кабелю на персональний комп’ютер. На персональному комп’ютері, в свою чергу, обробка даних здійснюється як за допомогою програми DS1000AE, якою був укомплектований осцилограф RIGOL, так і за допомогою програми Microsoft Office EXCEL.

**Висновки:**

1. Обробка та розпізнавання сигналів, що несуть інформативні ознаки технологічного процесу лазерного зварювання, а саме візуальних зображень, різного типу випромінювання чи сигналів акустичної та електромагнітної емісії є комплексною багаторівневою задачею, спроби щодо розв'язання якої неодноразово описані у науковій літературі. Проте побудова цілісної, універсальної системи аналізу зазначених сигналів поки що не реалізована.

2. Аналіз наукових праць за вказаною тематикою показує, що існує взаємозв'язок між режимом технологічного процесу лазерного

зварювання та зареєстрованими сигналами і що такий зв'язок проявляє себе в більшій або меншій ступені незалежно від методу дослідження. Достовірність обробки та розпізнавання сигналів залежить в перу чергу від методу, що враховує розподіл та взаємний зв'язок інформативних ознак в сигналі.

3. Електронно-оптичний варіант макету системи моніторингу лазерного зварювання, заснований на аналізі сигналів з фотодатчиків, показавши гарні результати. Після технологічної перевірки, даний спосіб буде використаний для впровадження оберненого зв'язку по потужності лазерного випромінювання.

**Список літератури:**

1. Glaessel T., Seefried J., Masuch M., Riedel A., Mayr A., Kuehl A., Franke J. Process Reliable Laser Welding of Hairpin Windings for Automotive Traction Drives. *2019 International Conference on Engineering, Science, and Industrial Applications (ICESI)*. Tokyo, Japan, 2019. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICESI.2019.8863004>
2. Churiaque C., Sánchez-Amaya J.M., Üstündağ Ö., Porrúa-Lara M., Gumenyuk A., Rethmeier M. Improvements of hybrid laser arc welding for shipbuilding T-joints with 2F position of 8 mm thick steel. *Optics & Laser Technology*. 2021. № 143. 107284. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107284>
3. Ancona A., Spagnolo V., Lugarà P. M., Ferrara M. Optical sensor for real-time monitoring of CO<sub>2</sub> laser welding process. *Applied Optics*. 2001. № 40 (33). P. 6019–6025. <https://doi.org/10.1364/AO.40.006019>
4. Bardin F., Cobo A., Lopez-Higuera J. M., Collin O., Aubry P., Dubois T., Högström M., Nylen P., Jonsson P., Jones Julian D. C., Hand D. P. Optical techniques for real-time penetration monitoring for laser welding. *Applied Optics*. 2005. № 44 (19). P. 3869–3876. <https://doi.org/10.1364/AO.44.003869>
5. Farson D.F. Progress in real time laser process monitoring: theory and practice. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2000. № 5 (3). P. 194–201. <https://doi.org/10.1179/136217100101538209>
6. Hoffman J., Szymanski Z., Jakubowski J., Kolasa A. Analysis of acoustic and optical signals used as a basis for controlling laser-welding processes. *Welding International*. 2002. № 16 (1). P. 18–25. <https://doi.org/10.1080/09507110209549484>
7. Fan X., Gao X., Liu G., Ma N., Zhang Ya. Research and prospect of welding monitoring technology based on machine vision. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. № 115. P. 3365–3391. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07398-4>
8. Shevchik S. A., Le-Quang T., Vakili Farahani F., Faivre N., Meylan B., Zanolli S., Wasmer K. Laser Welding Quality Monitoring via Graph Support Vector Machine With Data Adaptive Kernel. *IEEE Access*. 2019. № 7. P. 93108–93122. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2927661>

**Bernatskyi A.V., Nabok T.M., Yurchenko Yu.V., Siora O.V., Sokolovskyi M.V., Bondarieva V.I., Lukashenko V.A., Danyleiko O.O. USING A PHOTOELECTRON MULTIPLIER FOR MONITORING THE LASER WELDING PROCESS**

*With the development of laser welding technologies, the task of monitoring the welding process has arisen. Various monitoring systems and methods are used for this purpose. Recent research shows that there is a clear correlation between the laser welding process mode and the recorded signals, which allows for early detection of defects. However, due to the high cost and low accuracy of the sensors, these methods have not been widely used in industry before. Modern developments in sensor technology and artificial intelligence have significantly improved monitoring capabilities. The reduction in the cost of laser technology is contributing to the wider application of laser technology in industry, where real-time monitoring can reduce costs and improve product quality. The focus is on optical radiation in the welding zone, for which optical sensors are used. This paper is dedicated to the creation of a prototype laser welding process monitoring system based on a photo sensor. Semiconductor photocells are the most common for such tasks, but due to their high sensitivity to infrared radiation, they cannot be effectively used to monitor the laser welding process. Instead, vacuum photocells, such as the FEU-35 photomultiplier tube, have proven to be more suitable due to their spectral sensitivity in the 300–600 nm range and the ability to use optical filters to attenuate infrared radiation. The vacuum photoelectronic multiplier allows you to record deviations*

*in the intensity of the torch during welding, which signals possible defects in the welded joint. When the intensity of the light changes, the photocell generates a signal of up to 35 mA, which can be recorded by a RIGOL digital oscilloscope. The data obtained can be stored in the oscilloscope's memory or transferred to a personal computer for further processing using software such as Microsoft Office EXCEL. The proposed monitoring system shows promise for its integration into various production processes, allowing for high-precision control of the laser welding process in real time.*

**Key words:** *laser welding, monitoring, semiconductor photocell, sensor, electric circuit, layout, analog signal.*

# ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 004.9:004.4:004.7

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.1/06>**Батаєв С.В.**

Університет Уоріка

**Мельник О.С.**

Компанія ЕПАМ

## АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ РОБОТИ, ПЕРЕВАГ ТА ВИКЛИКІВ У ВИКОРИСТАННІ ХМАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В УМОВАХ СЬОГОДЕННЯ

У цій статті проведено детальний аналіз принципів роботи, переваг та викликів використання хмарних технологій в сучасних умовах. Описано основні принципи роботи хмарних рішень, включаючи масштабованість, доступність, оплату за використання та автоматизацію. Розглянуто переваги хмарних технологій, такі як зниження витрат на ІТ-інфраструктуру, гнучкість у зміні ресурсів, підвищення продуктивності завдяки доступу до новітніх технологій та забезпечення безпеки даних разом з автоматичним резервним копіюванням. Висвітлено виклики, з якими стикаються організації при використанні хмарних сервісів, зокрема питання безпеки, залежність від Інтернету, управління витратами, проблеми сумісності та дотримання регуляторних вимог. Стаття надає рекомендації для бізнесу щодо ефективного впровадження хмарних технологій, а також включає приклади успішного їх використання у різних галузях.

Наукова визна роботи полягає в комплексному аналізі сучасних аспектів використання хмарних технологій. Вона містить сучасний огляд останніх тенденцій, технологій та викликів, пов'язаних з хмарними технологіями у швидкозмінному ІТ-середовищі; висвітлює принципи роботи, переваги та виклики хмарних технологій у контексті їх впливу на бізнес-процеси та ІТ-інфраструктуру; надає конкретні рекомендації для підприємств щодо ефективного впровадження та використання хмарних технологій на основі новітніх досліджень та практичного досвіду. Надано рекомендації для підприємств, узагальнено та систематизовано наявні знання про хмарні технології, що дозволяє створити цілісне уявлення про хмарні технології.

Доведено, що використання хмарних технологій, яке стрімко розвивалося протягом останніх років, зіткнулося з низкою нових викликів, пов'язаних з воєнним станом. Основними викликами для хмарних сервісів в умовах воєнного стану є перебої з електропостачанням та Інтернетом, зростання кіберзагроз, міграція даних за кордон, витік ІТ-фахівців і зміна пріоритетів.

Висновки підкреслюють важливість ретельного планування та аналізу для максимізації переваг і мінімізації ризиків, пов'язаних із використанням хмарних технологій.

**Ключові слова:** хмара, хмарні технології, хмарні сервіси, хмарне середовище, хмарна інфраструктура.

**Постановка проблеми.** У сучасному світі хмарні обчислення стають невід'ємною частиною інформаційної інфраструктури багатьох організацій. Хмарні обчислення пропонують численні переваги, серед яких масштабованість, гнучкість, зниження витрат на ІТ-інфраструктуру та підвищення ефективності бізнес-процесів. Однак, попри очевидні переваги, використання хмарних обчислень пов'язане з низкою викликів і проблем, які можуть вплинути на їх ефективність і безпеку.

Однією з головних проблем є забезпечення безпеки даних. Зберігання та обробка конфіденційної інформації на зовнішніх серверах викликає занепокоєння щодо несанкціонованого доступу та можливої втрати даних. Крім того, існують проблеми, пов'язані з дотриманням законодавчих і нормативних вимог та захистом персональних даних.

Ще одним важливим аспектом є технічні проблеми, пов'язані з інтеграцією хмарних рішень з наявними корпоративними ІТ-системами.

Сюди відносяться такі питання, як сумісність, міграція даних і забезпечення безперебійної роботи систем у разі збоїв або перебоїв в роботі хмарних сервісів.

Не менш важливими є питання управління змінами в організаційній культурі та робочих процесах при переході до хмари. Опір співробітників змінам, необхідність навчання та адаптації до нових інструментів можуть стати додатковими викликами.

Тому аналіз принципів роботи, переваг та викликів у використанні хмарних технологій є актуальним і необхідним для розуміння того, як розгорнути ці технології максимально ефективно в сучасних умовах. Дослідження в цій сфері допоможуть визначити найкращі підходи та стратегії для подолання реальних проблем та максимізації переваг від використання хмарних рішень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженню стану та перспектив використання хмарних технологій у навчанні, освіті, управлінні приділяли увагу О. Андрощук, О. Головченко, О. О. Гриб'юк, Г. Литовченко, М. Петрушен. Натомість не приділено увагу розвитку хмарних технологій в умовах сьогодення – воєнного стану.

**Постановка завдання.** Метою статті є комплексний аналіз принципів роботи, переваг та викликів, пов'язаних з використанням хмарних технологій в сучасних умовах. Зазначене має на меті визначити ключові аспекти та фактори, що впливають на ефективність та безпеку хмарних рішень, а також сформулювати рекомендації щодо їх оптимального впровадження та використання.

**Виклад основного матеріалу.** Погоджуємось з М.О. Любимовою та В.А. Куликим: «Хмарні технології – це технології обробки цифрових даних, за допомогою яких комп'ютерні ресурси надаються інтернет-користувачеві як онлайн сервіс» [1, с. 41]. Хмарні обчислення – це сучасна технологія, яка дозволяє компаніям зберігати, обробляти та обмінюватися даними за допомогою віртуальних серверів та низки інших послуг, що надаються провайдерами хмарних обчислень. Однією з ключових переваг хмарних обчислень є гнучкість, що дозволяє компаніям масштабувати свої обчислювальні потреби відповідно до бізнес-вимог протягом певного періоду часу. Такий підхід дозволяє змінювати вартість обчислювальних потужностей відповідно до того, що потрібно в даний момент часу. Роблячи обчислювальні інструменти більш доступними, компанії можуть забезпечити зниження значних витрат на їх придбання та обслуговування. Це особливо важливо для малих і середніх підприємств, які не можуть дозволити

собі високі витрати на створення власних мереж інформаційної логістики та ІТ-інфраструктури [2, с. 180]. Тобто хмарні обчислення – це модель надання послуг, яка дозволяє користувачам віддалено отримувати доступ до обчислювальних ресурсів, таких як сервери, сховища, програмне забезпечення та мережеві сервіси через Інтернет. Замість того, щоб володіти власною інфраструктурою та керувати нею, користувачі можуть орендувати ці ресурси у постачальників хмарних послуг, таких як Amazon Web Services (AWS), Microsoft Azure та Google Cloud Platform (GCP).

При цьому хмарні технології дозволяють користувачам користуватися додатками без необхідності їх встановлення та отримувати доступ до своїх особистих файлів з будь-якого комп'ютера з доступом до Інтернету. Хмарна технологія – це технологія обробки даних, коли комп'ютерні ресурси надаються користувачам Інтернету як онлайн-сервіс [3, с. 4].

Використовуючи хмару, користувачам не потрібно турбуватися про обладнання, яке вони використовують. Користувачі можуть навіть не знати, що їхні фізичні сервери вийшли з ладу. За допомогою правильних інструментів дані можуть бути автоматично відновлені навіть після серйозної аварії. Якщо використовується хмарна інфраструктура, то можна відмовитися від віртуального сервера і придбати інший. Не доведеться думати про утилізацію або турбуватися про шкоду для навколишнього середовища [4, с. 6].

О. Андрощук, О. Головченко, Г. Литовченко, М. Петрушен зазначили наступне: «Основними перевагами хмарних технологій є: 1) доступність. Будь-хто, хто має підключений до Інтернету комп'ютер, планшет або мобільний пристрій, може отримати доступ до інформації, що зберігається в хмарі; 2) Час. Хмару можна використовувати для залучення клієнтів та підвищення рівня їхньої задоволеності; 3) Мобільність. Хмара дозволяє підключатися до потрібних серверів з будь-якого пристрою, без прив'язки до конкретного робочого місця. 4) Економічність. Доступ до хмари можна отримати з будь-якого пристрою, що має підключення до інтернету та веб-браузер; 5) Простота використання. Більшість хмарних платформ мають інтуїтивно зрозумілі консолі управління, які дозволяють підключати необхідні ресурси тоді, коли вони вам потрібні; 6) вибір; SaaS має низку готових рішень, які працюють за принципом «zareєстрував і використовуй». Існують також зрілі рішення PaaS, які можуть розгорнути власні рішення в хмарі. Багато постачаль-



ників пропонують послуги IaaS; 7) Гнучкість. Всі необхідні ресурси автоматично надаються провайдером. Висока технологічність; 9) Високопродуктивні обчислювальні потужності, які надаються користувачам і можуть використовуватися для зберігання, аналізу та обробки даних; 10) Надійність. Надійність, яку забезпечують сучасні хмарні обчислення, набагато вища, ніж надійність локальних ресурсів» [5, с. 85].

Хмарні рішення можуть значно скоротити витрати на IT-інфраструктуру завдяки кільком ключовим факторам: розгортання традиційної IT-інфраструктури вимагає значних капіталовкладень у сервери, мережеве обладнання та програмне забезпечення. За допомогою хмарного рішення ці ресурси можна орендувати, а не купувати, таким чином зменшуючи початкові витрати. Більшість хмарних провайдерів пропонують модель оплати за фактом використання. Це означає, що компанії платять лише за ті ресурси, які вони фактично використовують, уникаючи переоплати за невикористані потужності. Обслуговування та підтримка власної IT-інфраструктури вимагає значних ресурсів, включаючи електроенергію, охолодження, оновлення та підтримку апаратного та програмного забезпечення. Хмарні провайдери можуть взяти на себе ці завдання, дозволяючи компаніям зосередитися на своїх основних бізнес-процесах. Управління та підтримка традиційної інфраструктури вимагає висококваліфікованого IT-персоналу. У хмарних сервісах більшість технічних аспектів бере на себе провайдер, що усуває потребу у великій кількості спеціалістів [6, с. 58].

Крім того, хмарні технології пропонують високий ступінь гнучкості та адаптивності для зміни ресурсів відповідно до потреб бізнесу завдяки наступним особливостям: за допомогою хмарних сервісів ресурси (пам'ять, обчислювальна потужність, дисковий простір) можуть бути швидко і легко збільшені або зменшені відповідно до поточних потреб бізнесу. Це особливо важливо для компаній з сезонним або непередбачуваним навантаженням. Можливість розгортання нових ресурсів і сервісів майже миттєво дозволяє їм швидко реагувати на зміни в бізнес-середовищі та скорочувати час виведення на ринок нових продуктів і послуг. Хмарні платформи часто пропонують широкий спектр послуг та інструментів, які можна легко інтегрувати та налаштувати відповідно до конкретних потреб бізнесу. Це дозволяє створювати індивідуальні рішення без значних витрат часу та ресурсів. Співробітники можуть отримати доступ до ресурсів компанії з будь-якої

точки світу, що особливо важливо для віддаленої роботи та міжнародних компаній.

Варто також зазначити, що доступ до новітніх технологій через хмарні сервіси може допомогти підвищити продуктивність кількома способами: хмарні провайдери постійно оновлюють свої платформи та надають доступ до новітніх технологій, інструментів та програмного забезпечення. Це дозволяє компаніям використовувати найсучасніші рішення без необхідності постійно оновлювати власну інфраструктуру. Багато хмарних сервісів надають інструменти для автоматизації різних бізнес-процесів, зменшуючи таким чином ручну роботу, мінімізуючи помилки та підвищуючи ефективність. Хмарні платформи підтримують інструменти для спільної роботи (наприклад, Google Workspace, Microsoft 365), що дозволяє співробітникам ефективно взаємодіяти та обмінюватися інформацією в режимі реального часу, незалежно від їхнього місцезнаходження. Хмарне середовище уможливило швидке розгортання та тестування нових рішень, прискорюючи процес розробки та впровадження нових продуктів і послуг.

Хмарні провайдери пропонують високий рівень безпеки даних та автоматичне резервне копіювання: хмарні провайдери захищають дані клієнтів, використовуючи передові заходи безпеки, такі як шифрування даних, багатфакторна автентифікація та регулярний аудит безпеки. Багато хмарних сервісів пропонують автоматичне резервне копіювання даних, щоб забезпечити їх збереження у разі збою або втрати. Це дозволяє швидко відновити дані без значних втрат часу та інформації. Дані зберігаються в розподілених дата-центрах, тому їхня доступність гарантується навіть у разі виходу з ладу одного з них. Це підвищує надійність. Хмарний провайдер дотримується міжнародних стандартів і нормативних вимог щодо безпеки даних (наприклад, ISO/IEC 27001, GDPR), забезпечуючи таким чином високий рівень захисту та відповідність законодавчим вимогам.

З вищезазначеного можна підсумувати, що переваги хмарних обчислень наступні:

- По-перше, хмарні рішення дозволяють бізнесу зменшити витрати на купівлю та утримання власної IT-інфраструктури.

- По-друге, хмарні сервіси пропонують гнучкість у зміні ресурсів відповідно до змін у бізнесі.

- По-третє, доступ до найсучасніших технологій та програмного забезпечення дозволяє компаніям підвищити продуктивність.

– По-четверте, багато хмарних провайдерів пропонують високий рівень безпеки даних та автоматизоване резервне копіювання, що знижує ризик втрати даних.

Як влучно відмітив О.В. Зінченко: «Хмарні обчислення – це нова парадигма надання обчислювальних ресурсів, яка складається з базових ресурсів інфраструктури (апаратне забезпечення, системи зберігання даних, системне програмне забезпечення) та додатків, що надаються у вигляді сервісів. Ці послуги надаються незалежними постачальниками зовнішнім користувачам на платній основі. Ключовими особливостями хмарних обчислень є віртуалізація та динамічна масштабованість. Хмарні сервіси надаються кінцевим користувачам через веб-браузер або спеціальний програмний інтерфейс» [6, с. 49].

Тепер розглянемо детальніше принципи роботи хмарних технологій. Завдяки хмарним сервісам ресурси можна легко масштабувати відповідно до потреб користувачів. Це означає, що організації можуть збільшувати або зменшувати використання ресурсів без значних фінансових витрат.

Хмарні технології дозволяють отримати доступ до даних і програмного забезпечення з будь-якого місця, де є підключення до Інтернету. Це особливо важливо для віддалених працівників.

Більшість хмарних провайдерів використовують модель оплати за фактом використання, що допомагає знизити витрати.

Хмарні сервіси забезпечують високий ступінь автоматизації управління інфраструктурою, зменшуючи потребу в ручному втручанні.

Хмарні обчислення базуються на мережі серверів і центрів обробки даних, розподілених по всьому світу. Ці сервери підключені до єдиної віртуальної мережі, і користувачі можуть отримати доступ до таких ресурсів, як обчислювальні потужності та сховища даних. Користувачі можуть взаємодіяти з хмарними ресурсами через веб-інтерфейс або програмне забезпечення API.

Існує три основні типи хмарних сервісів. Програмне забезпечення як послуга (SaaS): у цій моделі програмне забезпечення надається користувачеві через Інтернет, а не встановлюється на його власний пристрій. Це економить час і ресурси на встановлення та обслуговування програмного забезпечення.

Platform as a Service (PaaS) (платформа як послуга) надає користувачам платформу для розробки, розгортання та управління власними додатками. Це економить час і зусилля на побудову та підтримку власної інфраструктури.

Інфраструктура як послуга (IaaS): надає користувачам доступ до основних ресурсів інфраструктури, таких як сервери, сховища та мережеві сервіси. Це дає користувачам гнучкість в управлінні своїми IT-ресурсами без необхідності володіти та керувати фізичною інфраструктурою [7, с. 55].

Але незважаючи на ряд переваг у роботі хмарних технологій бувають і деякі недоліки, що стають певним викликом. Хоча хмарні провайдери пропонують високий рівень безпеки, конфіденційність даних залишається важливим питанням, особливо для конфіденційних даних.

Доступ до хмарних ресурсів вимагає стабільного інтернет-з'єднання. Відсутність або низька якість інтернету може суттєво вплинути на продуктивність.

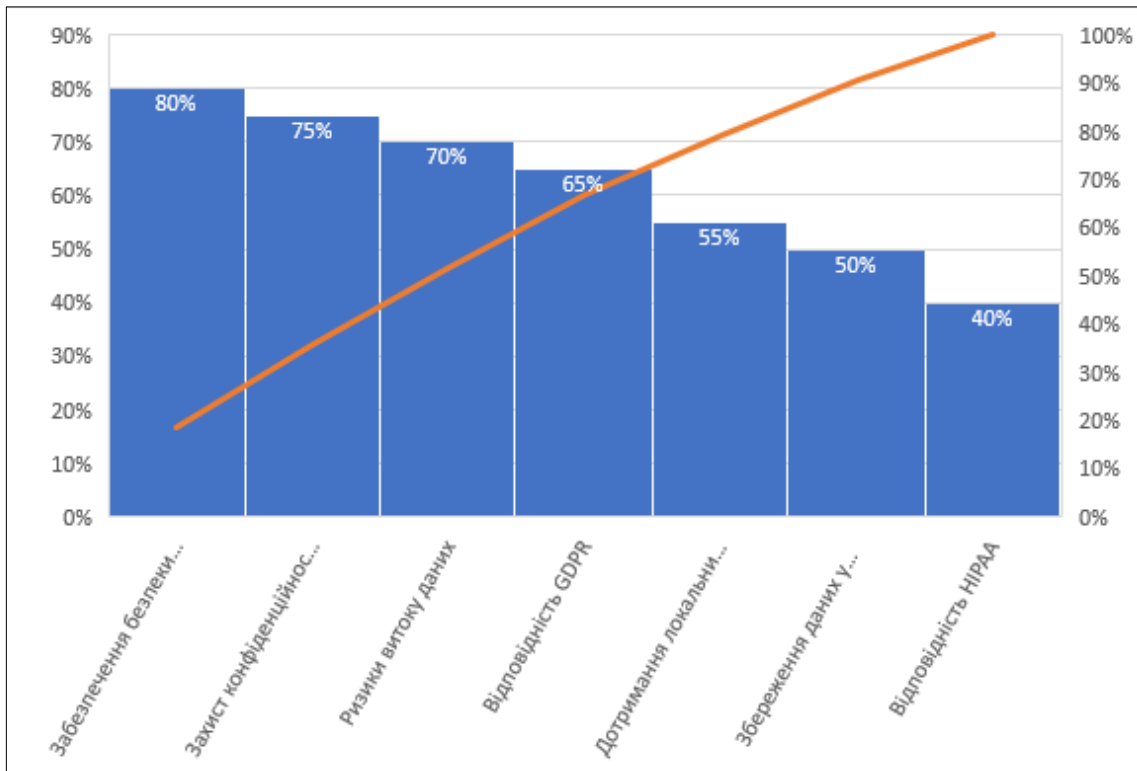
Неправильне планування та використання хмарних ресурсів може призвести до неочікувано високих витрат.

Міграція з локальної інфраструктури в хмару та між різними хмарними сервісами може бути складною і дорогою.

Використання хмарних сервісів може бути обмежене законодавчими та регуляторними вимогами, особливо у сфері обробки персональних даних. Розглянемо наочно виклики використання хмарних технологій на діаграмі, що ілюструє основні юридичні та регуляторні виклики у використанні хмарних технологій (рис. 1).

Як видно із діаграми дотримання Загального регламенту захисту даних щодо обробки персональних даних громадян ЄС є проблемою для 65 % компаній; дотримання Стандарту захисту даних у сфері охорони здоров'я HIPAA є проблемою для 40 % компаній, особливо в секторі охорони здоров'я. Забезпечення конфіденційності даних є викликом для 75 % компаній, оскільки це важливо для збереження довіри клієнтів. Необхідність зберігати дані в певній країні або регіоні є проблемою для 50 % компаній. Дотримання місцевих законів і правил є проблемою для 55 % компаній, особливо тих, що працюють на глобальних ринках. Забезпечення безпеки даних є проблемою для 80 % компаній, оскільки необхідно запобігати кібератакам та захищати конфіденційну інформацію. Ризик витоку даних є ключовою проблемою для 70 % компаній, що використовують хмарні технології, оскільки це може призвести до втрати фінансових та репутаційних ресурсів.

Згідно із сучасними дослідженнями, сьогодні споживачі ще не можуть контролювати інфраструктуру хмарних сервісів, але вже можуть



**Рис. 1.** Діаграма юридичних та регуляторних викликів серед компаній, що використовують хмарні технології

*Джерело: розроблено авторами*

здійснювати частковий контроль над наявними операційними системами, диференційованим програмним забезпеченням, механізмами та способами зберігання інформаційних ресурсів і навіть над багатьма компонентами, причому таким чином, що їхні підпорядковувати їх власним потребам [8, с. 261].

Наслідки воєнного стану, такі як відключення електроенергії та пошкодження комунікаційної інфраструктури, можуть спричинити проблеми з доступом до хмарних сервісів. Тому важливо мати запасний план на випадок руйнування ключових шляхів зв'язку, наприклад, використання VPN або локальних серверів. Варто бути готовими до змін у законодавстві та нормативних актах, що стосуються використання хмарних технологій і бути в курсі цих змін, щоб адаптувати операції з використанням хмарних сервісів до нових вимог.

На тлі війни зростає кількість кібератак на українські компанії та державні установи. Зловмисники використовують різні методи, такі як DDoS-атаки, фішинг, викрадення даних, для того, щоб завдати шкоди та дестабілізувати роботу українських організацій. Хмарні сервіси також стають мішенню для кібератак, адже вони містять цінну інформацію та дані.

Багато українських компаній з міркувань безпеки змушені були мігрувати свої дані та сервіси до хмарних провайдерів, що знаходяться за кордоном. Це може призвести до проблем з дотриманням законодавства про захист персональних даних, а також до залежності від іноземних компаній.

Через війну багато кваліфікованих ІТ-фахівців виїхали з України, що може призвести до дефіциту кадрів та ускладнення підтримки та обслуговування хмарних сервісів. В умовах війни багато компаній змушені були змінити свої пріоритети та скоротити витрати на ІТ, що може негативно вплинути на розвиток та впровадження хмарних технологій.

Зміцнення валюти або інфляція можуть призвести до значного зростання вартості хмарних сервісів. Важливо ретельно планувати свої витрати й шукати можливості для оптимізації використання хмарних ресурсів.

Зберігання персональних даних у хмарі може викликати занепокоєння щодо їх конфіденційності та безпеки, особливо в умовах воєнного стану. Важливо обирати перевіреного хмарного провайдера, який гарантує дотримання суворих стандартів захисту даних.

**Висновки.** Хмарні обчислення приносять значні переваги, такі як зниження витрат, підвищення продуктивності та гнучкості бізнесу. Однак ці

переваги супроводжуються такими проблемами, як безпека, конфіденційність та управління витратами. Ретельний аналіз і планування можуть максимізувати переваги хмарних обчислень і міні-

мізувати пов'язані з ними ризики. Використання хмарних технологій в умовах воєнного стану потребує ретельного планування, зважування ризиків та впровадження заходів з їх мінімізації.

#### Список літератури:

1. Любимов М.О., Кулик В.А. Можливості, загрози та перспективи використання «хмарних» технологій у бухгалтерському обліку. *Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі*. 2019. № 2 (93). С. 40–46.
2. Грабовенко Н.В., Потапова Н.А. Прогнозування кількості підприємств на ринку послуг хмарних обчислень за інтерполяційним поліномом Лагранжа. *Вісник студентського наукового товариства ДонНУ імені Василя Стуса*. 2023. Том 2. № 15. С. 180–184.
3. Хмарні технології в освіті : метод. реком. до лаб. роб. / уклад.: Оксана Наконечна. Житомир : Вид-во ЖДУ ім. Івана Франка, 2022. 99 с.
4. Гриб'юк О.О. Перспективи впровадження хмарних технологій в освіті. *Теорія та методика електронного навчання*. 2013. № 4. С. 45–59. URL: [https://lib.iitta.gov.ua/1111/1/grybyuk-stattya1-hmaryu+\\_Copy.pdf](https://lib.iitta.gov.ua/1111/1/grybyuk-stattya1-hmaryu+_Copy.pdf) (дата звернення: 20.05.2024).
5. Андрощук О., Головченко О., Литовченко Г., Петрушен М. Аналіз поняття хмарні технології: види, категорії, переваги та недоліки. *Молодий вчений*. 2021. № 6 (94). С. 83–87. DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2021-6-94-19>.
6. Зінченко О.В., Іщеряков С.М., Прокопов С.В., Сєрих С.О., Василенко В.В. Хмарні технології : Навчальний посібник. Київ : ФОП Гуляєва В.М., 2020. 74 с. URL: [https://duikt.edu.ua/uploads/1\\_2048\\_32915773.pdf](https://duikt.edu.ua/uploads/1_2048_32915773.pdf) (дата звернення: 20.05.2024).
7. Дем'яненко В.М., Коваленко В.В., Кравченко А.О., Носенко Ю.Г., Попель М.В., Рассовицька М.В., Стрюк А.М., Шишкіна М.П., Яцишин А.В. Методологія формування хмаро орієнтованого навчально-наукового середовища педагогічного навчального закладу : монографія Київ : Педагогічна думка, 2017. 146 с.
8. Досенко А.К. Хмарні технології: прикладні технології сучасних платформ. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Філологія. Журналістика*. 2022. Том 33 (72). № 1 (3). С. 257–262. DOI: <https://doi.org/10.32838/2710-4656/2022.1-3/41>.

#### **Bataiev S.V., Melnyk O.S. ANALYSIS OF THE PRINCIPLES OF OPERATION, ADVANTAGES AND CHALLENGES IN THE USE OF CLOUD TECHNOLOGIES IN TODAY'S CONDITIONS**

*This article provides a detailed analysis of the principles of operation and the benefits and challenges of using cloud technologies in today's environment. The author describes the basic principles of cloud solutions, including scalability, accessibility, pay-per-use, and automation. The advantages of cloud technologies are considered, such as reducing the cost of IT infrastructure, flexibility in changing resources, increasing productivity through access to the latest technologies, and ensuring data security with automatic backup. The article highlights the challenges that organizations face when using cloud services, including security issues, dependence on the Internet, cost management, compatibility issues, and regulatory compliance. The article provides recommendations for businesses on effectively implementing cloud technologies and includes examples of their successful use in various industries.*

*The scientific novelty of the work lies in a comprehensive analysis of modern aspects of the use of cloud technologies. It provides an up-to-date overview of the latest trends, technologies, and challenges related to cloud technologies in a rapidly changing IT environment; highlights the principles of operation, benefits, and challenges of cloud technologies in the context of their impact on business processes and IT infrastructures; provides specific recommendations for enterprises on the effective implementation and use of cloud technologies based on the latest research and practical experience. Recommendations for enterprises are provided, and existing knowledge about cloud technologies is summarized and systematized, which allows the creation of a holistic view of cloud technologies.*

*It has been proven that the rapidly developing use of cloud technologies has encountered several new challenges related to martial law. The main challenges for cloud services under martial law conditions are power and Internet outages, increased cyber threats, data migration abroad, IT specialists leaving, and shifting priorities.*

*The conclusions emphasize the importance of careful planning and analysis to maximize the benefits and minimize the risks associated with using cloud technologies.*

**Key words:** cloud, cloud technologies, cloud services, cloud environment, cloud infrastructure.

**Белоус Р.В.**

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

**Крилов Є.В.**

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

## ОПТИМІЗАЦІЯ ВИКОРИСТАННЯ RAFT В РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМАХ З БАЗАМИ ДАНИХ

Констатовано, що оптимізація використання алгоритму RAFT (*Répliated State Machine*) в розподілених системах з базами даних є важливим завданням для забезпечення стабільності та надійності системи. Наголошено, що метод Raft ґрунтується на використанні реплікованих машин стану, при цьому суть цього підходу полягає в тому, що конкретна група серверів має однаковий стан і може взаємозамінювати один одного у випадку виникнення проблем. У консенсусному алгоритмі Raft роль кожного учасника (вузла) в системі розділяється на три ключові категорії: Лідер (*leader*), що стежать (*followers*) і кандидати (*candidates*). Цей поділ на ролі є фундаментом, на якому будується вся система Raft. Лідер – це активний вузол, який тимчасово керує системою та приймає рішення щодо операцій, таких як запис даних. Він також відповідальний за ініціювання реплікації даних на інші вузли (стежать). Спостерігаючі вузли – це ті учасники системи, які стежать за лідером і виконують його команди. Вони отримують реплікаційні дані від лідера і зобов'язані дотримуватися узгодженості даних. Кандидати – це вузли, які бажають стати лідером. Вони ініціюють вибори, пропонуючи себе як нового лідера.

Алгоритм Raft використовує модель взаємодії за допомогою віддалених викликів (RPC), при цьому використовуючи лише дві віддалені процедури – *RequestVote* та *AppendEntries*. Значущою перевагою цього алгоритму є його здатність до автоматизованого управління кластером, що на практиці дозволяє вносити зміни в конфігурацію кластера без його зупинки. Ще одним важливим аспектом при використанні алгоритму є видалення застарілих запитів із журналу.

Перелічено та охарактеризовано такі методи оптимізації використання Raft в розподілених системах з базами даних, як налаштування параметрів алгоритму, реалізація асинхронного вводу-виводу, кешування стану, розпаралелювання операцій, реплікація даних, використання технік компресії, оптимізація мережевого взаємодії, поділ функціональності та розбиття на підкластери. Приведемо програмну реалізацію головних підходів до оптимізації досліджуваного алгоритму.

**Ключові слова:** Кластеризація, *Répliated State Machine*, Лідер, відмовостійкість, Кандидат, розпаралелювання.

**Постановка проблеми.** Алгоритми консенсусу представляють собою ефективний механізм для забезпечення відмовостійкості, надаючи засіб автоматичного відновлення лідера. У системах з архітектурою сервер-клієнт сервер виступає як єдина точка відмови, тому важливо забезпечити наявність реплік лідера, що можуть прийняти його функції у випадку відмови. Алгоритми консенсусу, зокрема Raft, використовуються для забезпечення узгодженості стану між лідером та його репліками в кластері. Оптимізація використання алгоритму RAFT (*Répliated State Machine*) в розподілених системах з базами даних стає важливим завданням для забезпечення стабільності та надійності системи [1].

Серед різних алгоритмів консенсусу, Raft є найбільш оптимальним для побудови систем, що

складаються з основного сервера та його реплік. Оскільки архітектура розподіленої системи передбачає наявність основного сервера та його реплік для підвищення надійності, вибір застосування алгоритму Raft для оптимізації є належним рішенням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Значні за обсягом дослідження із вивчення шляхів оптимізації використання Raft в розподілених системах з базами даних Хуанга Д. (Huang D.) [2], Паріса Ж. (Pâris J.) [4], Мельника Д. (Melnyk D.) [3].

**Постановка завдання.** Мета статті полягає в аналізі шляхів оптимізації використання Raft в розподілених системах з базами даних.

Методологічну основу дослідження становить сукупність методів, способів, підходів і прийомів наукового аналізу, зокрема, методів індукції

і дедукції, аналізу та синтезу, єдності історичного і логічного, абстракції, узагальнення, системного підходу до явищ, що вивчаються, а також порівняння і статистичні методи.

**Виклад основного матеріалу.** Метод Raft ґрунтується на використанні реплікованих машин стану. Суть цього підходу полягає в тому, що конкретна група серверів має однаковий стан і може замінити один одного у випадку неполадок. Наявність репліки стану є ключовою для забезпечення безпеки Raft, оскільки алгоритм гарантує, що якщо сервер вже зафіксував запис під певним індексом у журналі, інший сервер не може його перезаписати за тим самим індексом.

У Raft послідовники виступають як пасивні спостерігачі, обробляючи лише службові записи від лідера та кандидатів. Обробка запитів від клієнтів відбувається лідером, навіть якщо вони надходять через послідовників. Надійність алгоритму підтверджується його здатністю виявляти сервери з застарілими даними, оскільки кожен 50-ий службовий запит має термін, що дозволяє визначити актуальність інформації. Термін визначає одиницю часу для алгоритму, вказуючи на період лідерства [4].

Алгоритм Raft використовує взаємодію за допомогою віддалених викликів (RPC), використовуючи дві основні процедури – RequestVote та AppendEntries. RequestVote використовується для виборів кандидатів, в той час, як AppendEntries має більш універсальне застосування, синхронізуючи журнали послідовників з журналом лідера і передаючи періодичний сигнал про активність лідера. Вибори ініціюються в тому випадку, якщо послідовники перестають отримувати сигнал від лідера або отримують його пізніше, ніж передбачено їх конфігурацією.

У Raft, кожен послідовник підтримує одного кандидата, і вибори можуть завершитися обранням лідера або залишитися безрезультатними. У випадку, коли сервери висуюють свої кандидатури майже одночасно і голоси розподіляються між ними, можливий сценарій, коли ніхто не отри-

мує більшість голосів. Raft вирішує цю проблему, використовуючи різні таймаути для виборів у різних послідовників [2].

Таким чином, лише один сервер може першим висунути свою кандидатуру і отримати більшість голосів після таймауту. Навіть із вимогою до алгоритму, яка стверджує, що несвоєчасні дії не повинні впливати на безпеку використання Raft, вчасний вибір лідера є критичним під час виборів.

Реплікація журналу є ще однією важливою частиною алгоритму. Кожен клієнт надсилає команду для виконання машиною стану. Лідер записує команду в журнал і пересилає цей запис послідовникам, щоб вони теж його зафіксували у своїх журналах. Після цього команда виконується, і результат передається клієнту. Кожна команда в журналі має індекс та термін, і лише фіналізовані команди виконані та повернуті клієнту. Лідер зберігає індекс останньої фіналізованої команди та передає цю інформацію в запиті AppendEntries, щоб послідовники також отримували дані про виконані команди [3].

Для перевірки актуальності журналу послідовника, лідер включає індекс і термін передостанньої команди в службовий запит. У випадку відповіді послідовника помилкою вказується, що його журнал застарілий. В такому випадку лідер вирішує розбіжності, замінюючи записи послідовника своїми за допомогою процедури AppendEntries. Лідер продовжує відправляти AppendEntries із старішими командами до успішної відповіді послідовника. Важливою перевагою Raft є його автоматизоване управління кластером, що дозволяє вносити зміни в конфігурацію кластера без його зупинки, за допомогою концепції спільного консенсусу між серверами із старою та новою конфігурацією.

У першій фазі застосування нової конфігурації сервери з обох конфігурацій беруть участь у виборах та записують однакові записи до своїх журналів. Лідер поступово розсилає всім послідовникам нову конфігурацію, яку вони починають застосовувати.



Рис. 1. Схематичне зображення алгоритму Raft

Ще одним важливим аспектом при застосуванні алгоритму є очищення журналу від застарілих запитів. З урахуванням того, що з більшим потоком запитів від клієнтів розмір журналу збільшується, необхідні механізми для його зменшення. Одним зі способів зменшення журналу є створення знімків поточного журналу та збереження його в окремому сховищі даних.

Для всіх налаштувань використовуються файли в форматі json – config. json. Основні шляхи оптимізації використання алгоритму RAFT в розподілених системах з базами даних включає:

- Налаштування параметрів алгоритму RAFT: Оптимальне налаштування тайм-аутів інтервалів вибору лідера (election timeouts) та битів (heartbeat intervals) дозволяє забезпечити швидше виявлення втрати лідерства та підтримувати актуальність копій даних.

- Реалізація асинхронного вводу-виводу: Використання асинхронного вводу-виводу може покращити продуктивність системи, дозволяючи іншим операціям чекати завершення вводу-виводу без блокування виконання.

- Кешування стану: Зберігання копій стану у кеші дозволяє швидше відновлювати стан системи після відновлення збоїв або перезапуску вузла.

- Розпаралелювання операцій: Розпаралелювання операцій обробки логів та інших обчислень може покращити продуктивність кожного вузла та загальну продуктивність системи.

- Реплікація даних: Збільшення кількості реплік бази даних дозволяє підвищити надійність системи та прискорити читання, оскільки можна читати дані з найближчого вузла.

- Використання технік компресії: Застосування методів компресії даних може зменшити обсяг передаваних повідомлень між вузлами, що дозволяє скоротити час передачі та зменшити обсяг мережевого трафіку.

- Моніторинг та логування: Ефективне використання моніторингу та логування дозволяє вчасно виявляти проблеми та відслідковувати дії системи для подальшого аналізу та оптимізації.

- Оптимізація мережевого взаємодії: Мінімізація мережевого трафіку та використання оптимальних мережевих налаштувань сприяє швидшому обміну даними між вузлами.

- Поділ функціональності: Розподіл функціональності між різними вузлами архітектури дозволяє розпаралелювати обробку запитів та зменшити навантаження на кожен конкретний вузол.

- Шкальованість: Розробка системи з урахуванням можливості горизонтального та верти-

кального шкалювання дозволяє легше адаптувати систему до зростання обсягу даних та трафіку.

- Розбиття на підкластери: якщо Raft-система стикається з великим навантаженням, то доцільним є розбиття її на кілька підкластерів. Кожен підкластер буде працювати як окрема система з власними лідером і стежать учасниками. Приклад коду (на псевдокоді) для управління кластеризацією:

```

class ClusterManager:
    def __init__(self):
        self.clusters = []
    def createCluster(self, clusterId, nodes):
        cluster = RaftCluster(clusterId, nodes)
        self.clusters.append(cluster)
    def getCluster(self, clusterId):
        for cluster in self.clusters:
            if cluster.clusterId == clusterId:
                return cluster
class RaftCluster:
    def __init__(self, clusterId, nodes):
        self.clusterId = clusterId
        self.nodes = nodes
        self.leader = None
    
```

Врахування цих аспектів та їхнє належне впровадження допомагає оптимізувати використання алгоритму raft у розподілених системах з базами даних для досягнення оптимальної продуктивності та надійності.

Проаналізуємо черговість дій для практичного виконання оптимізації використання Raft в розподілених системах з базами даних. У консенсусному алгоритмі Raft роль кожного учасника (вузла) в системі розділяється на три ключові категорії: Лідер (leader), що стежать (followers) і кандидати (candidates). Цей поділ на ролі є фундаментом, на якому будується вся система Raft. Наведемо приклад коду (на псевдокоді) для визначення ролі вузла:

```

class Node:
    def __init__(self, id):
        self.id = id
        self.state = "follower" # Починаємо як наступний
        self.currentTerm = 0
        self.votedFor = None
    def becomeCandidate(self):
        self.state = "candidate"
        self.currentTerm += 1
        self.votedFor = self.id
    def becomeFollower(self, term, votedFor):
        self.state = "follower"
        self.currentTerm = term
        self.votedFor = votedFor
    def becomeLeader(self):
        self.state = "leader"
    
```

У цьому фрагменті коду ми створюємо клас Node, що представляє вузол у системі Raft, і визначаємо методи для зміни його стану. Коли вузол хоче стати кандидатом, він викликає `becomeCandidate()`, а для переходу в режим слідчого – `becomeFollower()`. Існує також метод `becomeLeader()`, який дозволяє вузлу стати лідером.

Тайм-ути і вибори лідера – важлива частина роботи алгоритму Raft. Якщо система виявить, що поточний лідер відсутній або недоступний, вона ініціює вибори нового лідера.

Тайм-аут (timeout): Кожен вузол в системі Art налаштований на випадковий тайм-аут, який визначає, як часто вузол перевіряє стан лідера. Якщо вузол не отримує повідомлення від лідера протягом заданого інтервалу часу, він починає процес виборів.

Процес вибору лідера: Під час виборів вузли конкурують за роль лідера. Кожен кандидат надсилає запити (прохання про голос) іншим вузлам. Якщо він отримує більшість голосів, то стає новим лідером.

Приклад коду для тайм-аутів та процесу вибору лідера:

```
class Node:
    def __init__(self, id, electionTimeout):
        self.id = id
        self.state = "follower"
        self.currentTerm = 0
        self.votedFor = None
        self.log = []
        self.commitIndex = 0
        self.electionTimeout = electionTimeout
        # Метод для перевірки настання тайм-аута
        def checkTimeout(self):
            # Логіка перевірки тайм-ауту
            pass
        # Метод для ініціювання виборів
        def startElection(self):
            # Логіка виборів pass
```

У даному коді ми маємо параметр `electionTimeout`, який представляє випадковий тайм-аут для кожного вузла. Метод `checkTimeout` перевіряє, чи настав тайм-аут, і якщо це сталося, вузол починає процес виборів за допомогою методу `startElection`.

Написання повноцінного програмного коду для оптимізації використання алгоритму RAFT в розподілених системах з базами даних – завдання велике та залежить від конкретного контексту та вимог вашого проекту. В даній статті наведемо приклад простого коду мовою програмування Python, що використовує бібліотеку `raft`, яка реалізує алгоритм RAFT.

```
from raft import RaftNode
class CustomStateMachine:
    def apply_log_entry(self, entry):
        # Логіка застосування запису до стану
    def query_state(self):
        # Запит на поточний стан
    def main():
        # Конфігурація вузла
        node_id = 1
        peers = [2, 3, 4] # інші вузли в системі
        # Створення вузла RAFT
        raft_node = RaftNode(node_id, peers, CustomStateMachine())
        # Запуск вузла
        raft_node.start()
        # Ваша логіка роботи з базою даних та інші оптимізації
        # Зупинка вузла при завершенні роботи
        raft_node.stop()
    if __name__ == "__main__":
        main()
```

Цей код використовує просту реалізацію `CustomStateMachine` для застосування логів та використовує базовий клас `RaftNode` з бібліотеки `raft`.

**Висновки.** Проведено аналіз використання алгоритму RAFT (Réplicated State Machine) в розподілених системах з базами даних та наголошено на важливості даного завдання для забезпечення стабільності та надійності системи. Перелічено та охарактеризовано такі методи оптимізації використання Raft в розподілених системах з базами даних, як налаштування параметрів алгоритму, реалізація асинхронного вводу-виводу, кешування стану, розпаралелювання операцій, реплікація даних, використання технік компресії, оптимізація мережевого взаємодії, поділ функціональності та розбиття на підкластери. Приведемо програмну реалізацію головних підходів до оптимізації досліджуваного алгоритму.

#### Список літератури:

1. Howard H. ARC: Analysis of Raft Consensus. [Електронний ресурс]. *University of Cambridge, Computer Laboratory*. 2014. URL: <https://www.cl.cam.ac.uk/techreports/UCAM-CL-TR857.pdf>.
2. Huang D. Performance Analysis of the Raft Consensus Algorithm for Private Blockchains [Електронний ресурс]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2020. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8666147>.



3. Melnyk D. Improving Raft When There Are Failures [Електронний ресурс]. *Distributed Computing Group, ETH Zurich. 2018 Eighth Latin-American Symposium on Dependable Computing (LADC)*. 2018. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8671595>.

4. Pâris J. Pirogue, a lighter dynamic version of the Raft distributed consensus algorithm [Електронний ресурс]. *2015 IEEE 34th International Performance Computing and Communications Conference (IPCCC)*. 2015. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7410281>.

### **Belous R.V., Krylov Ye.V. OPTIMIZATION OF RAFT USAGE IN DISTRIBUTED SYSTEMS WITH DATABASES**

*It is noted that optimizing the usage of the RAFT (Réplicated State Machine) algorithm in distributed systems with databases is a crucial task for ensuring system stability and reliability. Emphasis is placed on the fact that the Raft method is based on the use of replicated state machines, where a specific group of servers has an identical state and can replace each other in case of issues. In the Raft consensus algorithm, the role of each participant (node) in the system is divided into three key categories: Leader, Followers, and Candidates. This division into roles forms the foundation upon which the entire Raft system is built. The Leader is an active node temporarily in control of the system and makes decisions regarding operations such as data recording. It is also responsible for initiating data replication to other nodes (Followers). Followers are participants who observe the Leader and execute its commands. They receive replication data from the Leader and are obligated to maintain data consistency. Candidates are nodes that wish to become the Leader and initiate elections by proposing themselves as the new Leader.*

*The Raft algorithm operates on a remote procedure call (RPC) interaction model, utilizing only two remote procedures: RequestVote and AppendEntries. A significant advantage of the algorithm is its automated cluster management, allowing changes to the cluster configuration without stopping it. Another crucial aspect of applying the algorithm is clearing the log of outdated requests.*

*Various optimization methods for Raft usage in distributed systems with databases are enumerated and characterized, including tuning algorithm parameters, implementing asynchronous input-output, caching state, parallelizing operations, data replication, using compression techniques, optimizing network interaction, functional partitioning, and clustering. The programmatic implementation of these optimization approaches is provided.*

**Key words:** *Clustering, Réplicated State Machine, Leader, Fault Tolerance, Candidate, Parallelization.*

**Волк М.О.**

Харківський національний університет радіоелектроніки

**Саранча С.М.**

Харківський національний університет радіоелектроніки

**Гора М.В.**

Харківський національний університет радіоелектроніки

**Ковтун Є.І.**

Харківський національний університет радіоелектроніки

**Лабазов В.Г.**

Харківський національний університет радіоелектроніки

**Полозов Д.М.**

Харківський національний університет радіоелектроніки

## МОДЕЛІ РЕСУРСІВ ТА ПРОГРАМНИХ ЗАВДАНЬ ДЛЯ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ РОЗПОДІЛЕНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

У статті розглядаються питання підвищення ефективності розподілених інформаційних систем. Однією з основних задач, яка з'являється в процесі їх роботи – функціональна стійкість. Вона забезпечує продовження виконання функцій інформаційною системою в умовах відмови апаратних або програмних ресурсів, впливу дестабілізуючих факторів з боку внутрішніх компонентів або зовні. У роботі проводяться дослідження моделей, які використовуються для оцінки ефективності методів самовідновлення для забезпечення функціональної стійкості. Сучасні методи самовідновлення характеризуються значною вартістю, тому використання розроблених моделей спрямовано на її зниження. Метою даної роботи є підвищення ефективності розподілених інформаційних систем шляхом створення моделей ресурсів та програмних завдань з урахуванням процесів забезпечення функціональної стійкості. Запропоновані моделі враховують логічну структуру програмних завдань, що обслуговують інформаційну систему, поділяють їх на код та дані, структурно окреслюють підсистеми моніторингу, контролю, збереження даних та прикладну задачу. Основним цільовим параметром виступає продуктивність використання процесорів. Її урахування в процесах розподілу ресурсів дозволив підвищити коефіцієнт використання ресурсів, зменшити кількість ресурсів та зменшити час виконання програмних завдань. Для експериментальної оцінки моделей використовувалось середовище імітаційного моделювання хмарних систем WorkflowSim. У системі моделювання було використано кілька методів розподілу ресурсів. Для всіх методів була модифікована функція оцінки продуктивності, що була реалізована з урахуванням запропонованих моделей. Проведено порівняльний аналіз використання стандартних та пропонуєваних моделей. Аналіз результатів показує ефективність запропонованих моделей, а саме зменшення вартості виконання завдань.

**Ключові слова:** інформаційна система, комп'ютерні ресурси, хмарні обчислення, розподілені завдання, програма, продуктивність.

**Постановка проблеми.** Одною з основних властивостей сучасних розподілених інформаційних систем є підтримка функціональної стійкості, яка полягає у здатності продовжувати виконання своїх функцій в умовах відмови апаратних або програмних ресурсів, впливу внутрішніх або зовнішніх

дестабілізуючих факторів [1]. Одним з ефективних методів підтримки функціональної стійкості є самовідновлення структурних елементів і взаємозв'язків самою інформаційною системою [2; 3].

Реалізація функцій самовідновлення може використовувати спеціальні програмні компоненти,

спеціалізовані бібліотеки функцій, внутрішні сервіси операційних систем, віртуальні та фізичні машини тощо.

Процеси самовідновлення у програмних системах управляються брокерами на основі ряду методів. Прикладами є методи самовідновлення програм з перезапуском програмної системи, використанням дамтів пам'яті, журналізації зміни даних, мажоритарного резервування тощо. Ці універсальні методи дозволяють зберігати стан програмної системи і оновлювати стан при перезапуску програм. Загалом, ці методи нескладно реалізувати і вони використовують засоби операційних систем

Але основна проблема цих методів полягає в великій вартості. Це обумовлено об'ємами фізичної пам'яті для зберігання даних і стану програмної системи, часом, який витрачається на моніторинг, збереження стану та відновлення після збоїв. Тому для зменшення вартості обслуговування процесів забезпечення функціональної стійкості необхідно розвивати методи управління розподіленими обчисленнями.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Використання спеціальних програм, які є складовою інформаційної системи, надає можливість відновити виконання функції зсередини самої системи [4; 5]. Такі програмні засоби зустрічаються в сучасних операційних системах та фреймворках, наприклад у платформі .NET. Також вони можуть бути частиною бідь якої програми та

оброблятися винятками (an exception), які дозволяють обробити помилку в момент її виникнення та автоматично або автоматизовано дозволити системі управління уникати її у майбутньому.

У тих випадках, коли відбуваються апаратні збої, в процесі самовідновлення виникають задачі пошуку нових ресурсів для перерозподілу програм з відновленням взаємозв'язків. Ефективність роботи тоді залежить від роботи модулів моніторингу програм, обладнання, каналів зв'язку та методів управління розподіленими обчисленнями [6].

В даній статті будемо використовувати розподілену структуру середовища виконання розподіленого програмного забезпечення з підтримкою самовідновлення, яка запропонована в роботах [3; 6]. Структурна схема середовища розподіленого обчислювального процесу наведена рис. 1.

Теоретико-множина модель середовища розподіленого обчислювального процесу містить наступні елементи:

$$PS = \bigcup_i Pr_i, i = \overline{1, N}, \quad (1)$$

$$Pr = \{ \bigcup Cd, Dt \} = \{ Cd_u, Cd_m, Cd_s, Dt \},$$

де  $Pr$  – програма (належить інформаційній системі), яка в свою чергу складається з коду ( $Cd$ ) і даних ( $Dt$ ). Код програмних компонент поділяється на три групи: обчислювальну прикладну задачу ( $Cd_u$ ), моніторингу та контролю ( $Cd_m$ ), збереження даних програми ( $Cd_s$ ).

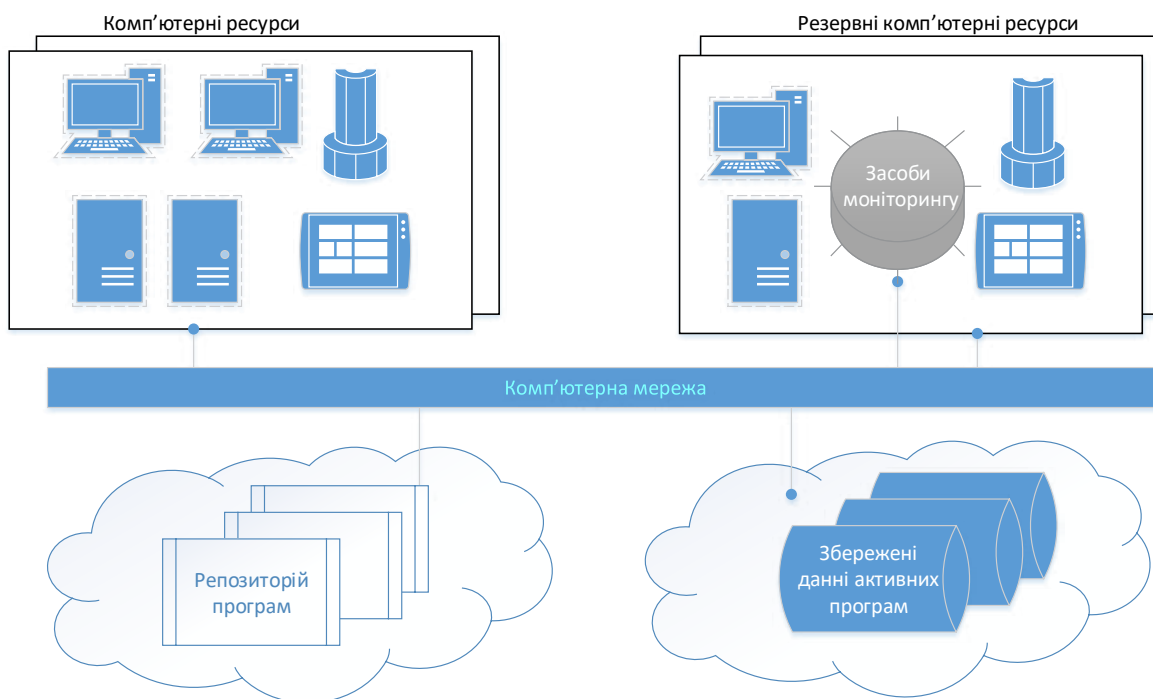


Рис. 1. Структура середовища розподіленого обчислювального процесу

**Постановка завдання.** Мета даної роботи полягає у підвищенні ефективності розподілених інформаційних систем шляхом створення моделей ресурсів та програмних завдань для процесів забезпечення функціональної стійкості.

**Виклад основного матеріалу.** В процесі розробки програмного забезпечення створюється програмний код на високорівневій мові програмування. Компілятор транслює цей код в бінарний файл виконання на машинній мові процесора, який є ядром обчислювального ресурсу. Це може відбуватися заздалегідь (з отриманням файлу, що готов до виконання) або у реальному часі, як це відбувається у кластерних системах. Тому, пропонується розширити модель програмних компонент завдання (1) компілятором  $Cd_C$ . Крім того, конкретизуємо дані програм вхідними файлами з кодами програм на високорівневих мовах програмування  $Dt_{Pr_i}$ ,  $i = 1, N$ . В розподіленому обчислювальному середовищі кількість компіляторів загалом залежить від кількості існуючих платформ  $Cd_{C_p}$ ,  $p = \overline{1, P}$ , де принципово можливо виконати програму  $Pr_i$ . Кількість таких компіляторів може збільшуватися у часі з появою нових процесорів, операційних систем, фреймворків. З іншого боку, деякі ресурси неможливо використовувати з урахуванням гетерогенності інформаційних систем. Тому множину ресурсів, що долучаються до обчислювального процесу, можна поділити за ознакою можливості створення програми  $Pr_i$  для конкретного а обчислювального ресурсу  $R_j$ .

Розглянемо функцію  $\varphi(Dt_{Pr_i}, R_j)$ , що буде відповідати за визначення можливості створення програми  $Pr_i$  на базі існуючого вхідного коду  $Dt_{Pr_i}$ ,  $i = 1, N$ , компілятору даної обчислювальної платформи  $Cd_{C_p}$ ,  $p = \overline{1, P}$ , для конкретного ресурсу  $R_j$ :

$$\varphi(Dt_{Pr_i}, R_j) = \begin{cases} Pr_i^j, & \text{якщо } \exists Cd_{C_p}, p = \overline{1, P}, Dt_{Pr_i} \xrightarrow{Cd_{C_p}} Pr_i \\ \emptyset, & \text{в іншому випадку} \end{cases} \quad (2)$$

Результатом виконання функції (2) на пространстві можливих пар елементів  $Dt_{Pr_i}, R_j$  є матриця  $\Phi$ , яка містить атрибути програм для ресурсів з можливим виконанням, які вказують на можливість створення коду  $i$ -ї програми для  $j$ -го обчислювального ресурсу:

$$\Phi = \begin{vmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & \varphi_{13} & \cdots & \varphi_{1N} \\ \varphi_{21} & \varphi_{22} & \varphi_{23} & \cdots & \varphi_{2N} \\ & & \cdots & & \\ \varphi_{M1} & \varphi_{M2} & \varphi_{M3} & \cdots & \varphi_{MN} \end{vmatrix}. \quad (3)$$

Для спрощення можна використовувати топологічну матрицю  $\Phi'$ , яка створюється на базі основної матриці (3), при цьому кожний елемент нової матриці  $\Phi'$  формується за виразом:

$$\varphi'_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \varphi_{ij} = Pr_i^j \\ 0, & \text{якщо } \varphi_{ij} = \emptyset \end{cases}. \quad (4)$$

В результаті отримаємо матрицю

$$\Phi' = \begin{vmatrix} \varphi'_{11} & \varphi'_{12} & \varphi'_{13} & \cdots & \varphi'_{1N} \\ \varphi'_{21} & \varphi'_{22} & \varphi'_{23} & \cdots & \varphi'_{2N} \\ & & \cdots & & \\ \varphi'_{M1} & \varphi'_{M2} & \varphi'_{M3} & \cdots & \varphi'_{MN} \end{vmatrix}. \quad (5)$$

Матриця (5) оцінює можливість розподілення  $i$ -ї програми за  $j$ -им обчислювальним ресурсом. Матриця (3) містить атрибути (reference), що дозволяють знайти у репозиторії (рис. 1)  $i$ -у програму та компілятор для відповідного  $j$ -го ресурсу з резервних комп'ютерів.

В процесах самовідновлення програмн забезпечення інформаційних систем для підвищення ефективності методів управління треба враховувати продуктивність комп'ютерних ресурсів та обчислювальну складність програм. Для цього пропонується два вектора:

$$\overline{\rho_j^R} = \langle \rho_1^R, \rho_2^R, \dots, \rho_M^R \rangle, \quad j = \overline{1, M} \quad (6)$$

та

$$\overline{\rho_i^P} = \langle \rho_1^P, \rho_2^P, \dots, \rho_N^P \rangle, \quad i = \overline{1, N}, \quad (7)$$

що оцінюють продуктивність ресурсів  $j$  та заплановану продуктивність, необхідну для виконання  $i$ -ї програми.

Значення продуктивності  $\rho$  може бути характеристикою процесору або визначатися на основі функції згортання на основі множини атрибутів комп'ютера, таких як обсяги фізичної пам'яті, коефіцієнт використання процесору, часу доступу до зовнішньої пам'яті та комунікаційних каналів тощо. В останньому випадку, задача розподілу програм за комп'ютерними ресурсами ускладнюється.

У випадку гетерогенних інформаційних систем це завдання є більш складним. Методи управління в таких випадках повинні враховувати різні характеристики продуктивності наявних ресурсів та програм. Загалом, в такому випадку, для вирішення завдань ефективного використання ресурсів, пропонується розширити модель розподіленого обчислювального середовища з використанням векторів (6) та (7) та отримати наступну матрицю:

$$\Phi^P = \begin{pmatrix} \rho_1^P / \rho_1^R & \rho_2^P / \rho_1^R & \rho_3^P / \rho_1^R & \dots & \rho_N^P / \rho_1^R \\ \rho_1^P / \rho_2^R & \rho_2^P / \rho_2^R & \rho_3^P / \rho_2^R & \dots & \rho_N^P / \rho_2^R \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho_1^P / \rho_M^R & \rho_2^P / \rho_M^R & \rho_3^P / \rho_M^R & \dots & \rho_N^P / \rho_M^R \end{pmatrix}, \quad (8)$$

елемент якої  $\frac{\rho_i^P}{\rho_j^R}$  є коефіцієнтом використання продуктивності  $j$ -го комп'ютерного ресурсу  $i$ -ю програмою. Будемо враховувати, що у випадку  $M \neq N$  (кількість програм і ресурсів не рівні), можливі ситуації, коли кілька програм розподілено на один ресурс  $i$ , навпаки, деякі ресурси зовсім не завантажені програмами.

Для можливості реалізації таких моделей продуктивність завдань та комп'ютерних ресурсів повинні бути нормованими або дійсними (для програмних завдань це виконує користувач, для ресурсів – постачальник), але приведені для забезпечення можливості порівняння. Наприклад, у GRID-системах цей обов'язок покладається користувача: задати планову продуктивність або плановий час виконання за допомогою відкритої статистичної інформації про кластер, що використовується. Але, на практиці, часто дійсні параметри в умовах динамічної зміни ресурсів, складності оцінки програм, такі характеристики отримати складно. У такому випадку перспективним бачиться отримання нормованих характеристик на базі бенчмарків, що виконуються як для програм в завданнях, так і для комп'ютерних ресурсів до початку виконання.

Для моделювання процесу розподілених обчислень в хмарних системах було використано проєкт з відкритим доступом WorkflowSim [9], який дозволяє порівняти ефективність роботи системи управління з використанням запропонованих моделей з моделями, які реалізовані в системі моделювання та представляють найбільш використовувані моделі в сучасних планувальниках. У системі моделювання реалізовано кілька методів розподілу ресурсів. Для проведення експериментів було вибрано наступні методи: first-come-first-served (FCFS), Min-Max (мінімальний час виконання, максимальна продуктивність), і Round Robin (RR). В усіх методах була добавлена функція оцінки продуктивності, побудована на запропонованих моделях. Методи самовідновлення використовувалися стандартні, заложенні в систему керування розподіленими обчисленнями.

В методі FCFS у порядку надходження програм на виконання на основі вектору (6) обирався ресурс з найбільш близькою продуктивністю, що підвищувало коефіцієнт використання ресурсу та зменшувало час простою ресурсу, чим зменшувало загальну вартість виконання обчислювального процесу.

В двох наступних методах аналіз проводився у ситуації, коли рішення приймалося при наявності повної інформації про множину програм та ресурсів. Для формування функції вибору ресурсу для конкретної програми використовувалась матриця (8). Функція містила три етапи. На першому етапі працювала стандартна функція методу. На другому – з допустимих рішень обиралось то, додавання продуктивності якого до одного з ресурсів не перевищувало загальну продуктивність ресурсу. Якщо на другому етапі ресурс було неможливо призначити, обирався найближчий за продуктивністю ресурс з решти допустимих рішень.

Для проведення експериментів в системі моделювання було використано різну кількість ресурсів і програм для перевірки валідності запропонованих моделей. Кількість програм визначалась у діапазоні від 100 до 1000, кількість ресурсів – 16–64, об'єм фізичної пам'яті кожного ресурсу – 32 Gb, об'єм зовнішньої пам'яті – 8Tb, гіпервізор Xen. Потік програм, поточна конфігурація та збої генерувались випадково, але для кожної згенерованої конфігурації застосовувались усі три метода з стандартними та модифікованими моделями. Отримані в результаті характеристики були усереднені на основі нормування умовної вартості використання ресурсів. Результати оцінки вартості використання ресурсів наведено на рис. 2.

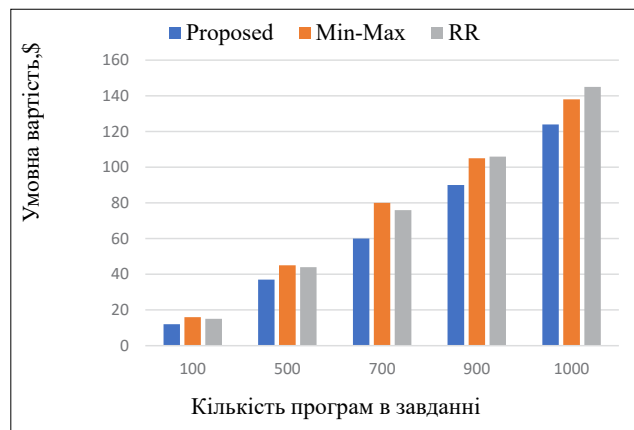


Рис. 2. Оцінка вартості розподілених обчислень

В експериментах використано однорідні ресурси, тому і вартість використання усіх ресурсів була визначена однаковою. Аналіз результатів показує ефективність запропонованих моделей, а саме зменшення вартості виконання завдань. За рахунок відновлення стану програмних компонент, обчислювальних процес відновлює виконання своїх функцій швидше, ніж з застосуванням стандартних методів.

**Висновки.** У статті розглянуто задачу підвищення ефективності розподілених інформаційних систем з використанням самовідновлення для підтримки функціональної стабільності. Запропоновані в роботі моделі враховують логічну структуру програмного забезпечення інформаційної системи, структурно виділяють в них код, дані,

підсистему моніторингу, контролю, збереження даних та прикладну задачу.

Використання запропонованих моделей в стандартних методах управління розподіленими обчисленнями, дозволило в описаних експериментах знизити вартість виконання програмних завдань.

При проведенні експериментів використовувався випадок однорідних ресурсів і вартість використання усіх ресурсів була визначена однаковою. Однак, перспективним бачиться вивчення питання модифікації моделей з урахуванням гетерогенності сучасних комп'ютерних ресурсів та застосування моделей в інших методах розподілу ресурсів та управлінні обчислювальним процесом хмарних систем.

#### Список літератури:

1. Собчук В.В., Барабаш О. В., Мусієнко А.П. Основи забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем підприємств в умовах впливу дестабілізуючих факторів : монографія. Київ : Міленіум, 2022. 272 с. ISBN 973-966-8063-82-3
2. Hudaib, A., Fakhouri, H.N., Al Adwan, F.E., & Fakhouri, S.N. A Survey about Self-Healing Systems (Desktop and Web Application). *Communications and Network*. 2017. Vol. 09. № 01. P. 71–88. DOI: 10.4236/cn.2017.91004
3. Волк М.О., Гора М.В., Филимончук Т.В., Казмина Д.Р., Ольшанска Т.І. Модифікований метод самовідновлення програмних систем з використанням дампу пам'яті. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. Харків, 2019. № 1 (7). С. 121–129. DOI: 10.26906/SUNZ.2021.3.074
4. Manzoor A., Rajput U, Phulpoto N, Abbas F, Rajput M. Self-healing in Operating Systems. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*. May 2018. Vol. 18. № 5. P. 92–98.
5. Wang Z., Wang J. Self-healing resilient distribution systems based on sectionalization into microgrid. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2015. 30 (6). P. 3139–3149. DOI: 10.1109/TPWRS.2015.2389753
6. De Lemos R., Giese H., Muller H.A., Shaw M., Andersson J., Litoiu M., Schmerl B., Tamura G., Villegas N.M., Vogel T. et al.: Software engineering for self-adaptive systems: a second research roadmap. In: *Software Engineering for Self-Adaptive Systems II*, Springer. 2013. P. 1–32. DOI: 10.1007/978-3-642-35813-5\_1
7. Рубан І.В., Волк М.О., Пісухін М.В. Метод самовідновлення розподіленого програмного забезпечення в гетерогенних комп'ютерних системах. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2019. № 3 (64). С. 17–23. DOI: 10.31673/2412-4338.2019.031723
8. Волк М.О., Гора М.В., Лабазов В. Г., Міщенко А.В., Барсуков А.І., Голець В.В. Журналізація стану програм для самовідновлення паралельних програмних систем. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2023. № 2 (72). С. 76–82. DOI: 10.26906/SUNZ.2023.2.080
9. WorkflowSim <https://github.com/WorkflowSim/WorkflowSim-1.0>. (date of access: 20.01.2024)

#### **Volk M.O., Sarancha S.M., Hora M.V., Kovtun Ye.I., Labazov V.H., Polozov D.M. MODELS OF RESOURCES AND SOFTWARE TASKS FOR SYSTEMS IMPROVEMENT OF FUNCTIONAL STABILITY OF DISTRIBUTED INFORMATION SYSTEMS**

*The article examines the nutritional efficiency of the distributed information systems. One of the main tasks that appear in the process of their work is functional stability. It will ensure the continuation of the established functions of the information system in the minds of hardware and software resources, the influx of destabilizing factors from the internal components or external parts. The article is conducting research on models that are being tested to evaluate the effectiveness of self-healing methods to ensure functional stability. Current methods of self-innovation are characterized by significant variability, which means that the development of fragmented models is directly related to their reduction. The goal of this work is to improve the efficiency of distributing information systems by creating models of resources and software specifications to ensure functional stability. The proposed models provide a logical structure of software tasks that serve the information system, subordinate them to the code and data, structurally integrate subsystems for monitoring, control, data saving and the application task. The main target parameter is the productivity*

*of the processor using. This regulation in the processes of distribution of resources will allow you to increase the ratio of resource allocation, change the number of resources and reduce the time required to complete program tasks. For the experimental evaluation of the models, the middle part of the simulated WorkflowSim system was used. The modelling system had a number of methods available for different types of resources. For all methods, the productivity assessment function was modified and implemented in accordance with the structure of the models. A comprehensive analysis of the various standard and proposed models was carried out. An analysis of the results shows the effectiveness of the model assignments, and the resulting change in the performance of the task.*

**Key words:** *information system, computer resources, cloud computing, distributed tasks, program, productivity.*

**Гайда А.Ю.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

**Морозова Г.С.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

## МЕХАНІЗМ АДАПТИВНОГО НАВЧАННЯ ГЛИБОКИХ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

*Глибоке навчання останнім часом набуває все більшої популярності як за рахунок прогресу в обчислювальній техніці, так і завдяки демонстрації все більш успішних і переконливих результатів у вирішенні складних задач. Сучасні штучні нейронні мережі (ШНМ), навчені на значних обсягах даних, здатні ідентифікувати та класифікувати складні образи і явища, а глибокі ШНМ (ГШНМ) також здатні розпізнавати внутрішні неявні закономірності та зв'язки, оцінювати можливості, робити прогнози та приймати рішення. Створення, навчання і використання таких мереж вимагає комплексного розв'язання задач збору і підготовки даних, вибору архітектури мережі і процедури навчання тощо. Однією з проблем навчання ШНМ є проблема зникаючого градієнту, що обмежує застосування ШНМ лише для вирішення задач, що або не вимагають глибокого навчання, або пов'язані з даними, що мають просторову або часову локальність.*

*У статті розглянута проблема зникаючого градієнту, що має місце при навчанні повно-зв'язних ГШНМ та представлені результати аналізу особливостей зникаючого градієнту за результатами яких зроблено спробу часткового подолання зазначеної проблеми шляхом модифікації алгоритму навчання мережі. Отримані результати дозволили створити та здійснити навчання повно-зв'язних ГШНМ з числом прихованих шарів від 5 до 15. Апробації результатів здійснена на академічних наборах даних. Отримані результати можуть бути застосовані при розробці моделей навчання ШНМ.*

**Ключові слова:** штучна нейронна мережа, глибока штучна нейронна мережа, повно-зв'язна штучна нейронна мережа, навчання штучної нейронної мережі, зникаючий градієнт, вибуховий градієнт, «Іриси Фішера», «Червоне вино», «Біле вино».

**Постановка проблеми.** Глибоке навчання – це галузь машинного навчання, яка базується на глибоких штучних нейронних мережах (ГШНМ). Глибоке навчання дозволяє генерувати і використовувати складні моделі, досліджувати внутрішні залежності в даних і на їх основі продукувати нові знання. Не зважаючи на те, що штучні нейронні мережі здебільшого є програмними продуктами (хоча існують і цілком апаратні рішення), принципи їх роботи ґрунтуються не на програмуванні, а на навчанні. Навчання здійснюється як направлений пошук передаточної функції мережі, щоб найбільш точно відтворити вихідні значення з вхідного набору даних (званого навчальною вибіркою) для відповідних вхідних значень з цього ж набору і, очікувано, знайти вихідні значення для даних, що не входять до навчальної вибірки. Результати навчання зберігаються як вагові коефіцієнти в структурі мережі і можуть розглядатись як зважені асоціації між вхідними даними та результатами часткової або повної обробки вхідних даних.

Не зважаючи на велику кількість бібліотек і пакетів програм для побудови ГШНМ, створення ефективної мережі, здатної при вирішенні складної задачі надавати надійні і достовірні результати, вимагає застосування, а іноді і пошуку певних правил збору і підготовки вхідних даних, вибору архітектури мережі, технологій навчання тощо, що відповідають складності задачі і вимогам до результатів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Однією з нагальних проблем навчання ГШНМ є проблема зникаючого (вибухового) градієнту (vanishing gradient), яка полягає в тому, що значення помилки, отриманої на виході мережі, експоненціально зменшується при передачі від виходу до входу (якщо градієнт менше 1) або стрімко зростає (якщо градієнт більше 1). Одним із поширених засобів подолання цієї проблеми є зменшення швидкості навчання, що призводить до уповільнення процесу навчання, або, навіть, унеможливує його [1–3]. Як відомо, проблема зникаючого градієнту є наслідком застосування сигмоїдальної передаточної функції нейрона для приведення зна-



чення виходу нейрона до визначеного діапазону (зазвичай від 0 до 1.0 або від  $-1.0$  до 1.0). Найбільше ця проблема виявляється в повно-зв'язних штучних нейронних мережах. В згорткових ШНМ цю проблему вдалось частково подолати за рахунок заміни сигмоїдальної передаточної функції нейрона функцією обчислення згортки, що дозволило застосовувати лінійно-ламані функції активації. Але, впровадження згортки також обмежує область використання згорткових ШНМ лише задачами, що передбачають просторову або часову локальність даних – як, наприклад, зображення, звук, динаміка фінансових показників тощо. Таким чином, повно-зв'язні ШНМ здатні вирішувати задачі різної природи, але їх використання обмежене неможливістю застосування у випадках, що вимагають глибоких мереж, а згорткові ШНМ здатні вирішувати задачі, що вимагають глибоких мереж, але їх використання обмежене необхідністю просторової або часової локальності даних. Все це разом обумовлює інтерес до подальших досліджень повно-зв'язних ШНМ.

**Постановка завдання.** Мета роботи – зменшити швидкості навчання, що призводить до уповільнення процесу навчання, або, навіть, унеможливує його, дану проблему вирішити за рахунок забезпечення деякої «оптимальної» швидкості навчання кожного шару.

**Виклад основного матеріалу.** В роботі зроблено спробу аналізу особливостей навчання повно-зв'язних глибоких штучних нейронних мереж і запропоновані зміни до процесу навчання класичної повно-зв'язної ШНМ, які дозволили частково вирішити задачу подолання зникаючого (вибухового) градієнту.

Для вирішення поставленої задачі були створені глибокі (від 5 до 15 шарів) повно-зв'язні ШНМ (рисунок 1) різної архітектури. Для тестування розроблених ГШНМ були використані академічні набори даних – «Іриси Фішера», «Червоне вино», «Біле вино» – і обрані архітектури мереж, що відповідають складності цих даних. В процесі тестування вирішувалась задача класифікації. Всі набори даних були попередньо нормалізовані, а набори даних «Червоне вино» і «Біле вино» також були збалансовані шляхом циклічного додавання у набір наявних даних з міноритарних класів, недостатньо представлених у вхідному наборі. Початковий розподіл даних за класами для наборів даних «Червоне вино» і «Біле вино» представлений на рисунках 2 і 3. Набір даних «Іриси Фішера» балансування не потребував, оскільки всі представлені у наборі класи збалансовані [6]. Використання настільки

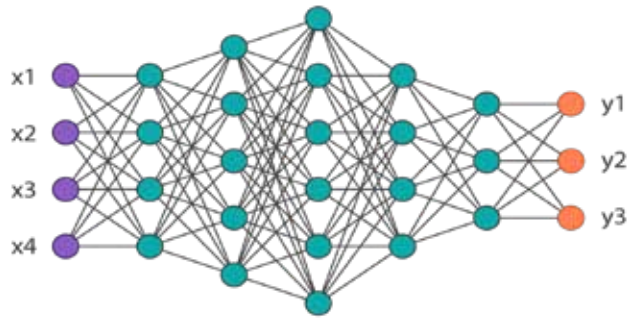


Рис. 1. Повно-зв'язна нейронна мережа

простого методу балансування для наборів даних «Червоне вино» і «Біле вино» обумовлене бажанням простого відтворення отриманих результатів та бажанням нівелювати вплив на отримані результати наявних методів балансування, що базуються на синтетичних даних – як, наприклад, SMOTE (Synthetic Minority Over-sampling Technique) [4].

В процесі навчання ГШНМ цілком виявилась проблема зникаючого градієнту і, як наслідок, мала місце низька якість навчання. Зважаючи, що ефект зникаючого градієнту виявляється як послідовне зменшення градієнту від виходу до входу на кожному з шарів мережі, була здійснена перевірка затухання градієнту на кожному з шарів мережі. Найбільш характерні значення градієнтів при моделюванні на зазначених наборах даних представлені на рисунках 4–6.

В результаті аналізу отриманих результатів було очікувано виявлено, що вхідні шари навчаються значно повільніше, ніж вихідні (що, загалом і складає проблему зникаючого градієнту), але також було виявлено, що ця проблема найбільше проявляється на пізніх стадіях навчання, а на початкових стадіях навчання основний внесок у помилку мережі

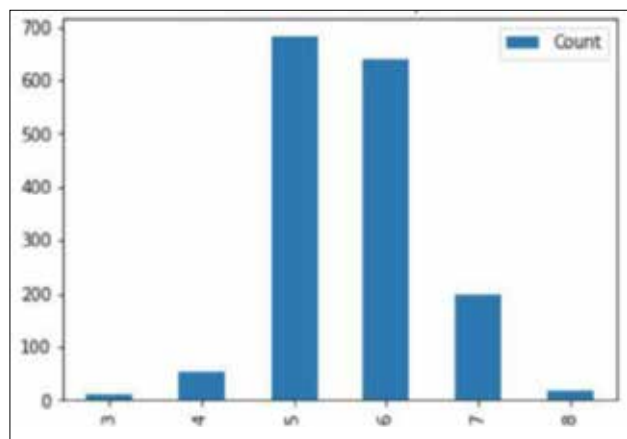


Рис. 2. Розподіл даних за класами для набору даних «Червоне вино»

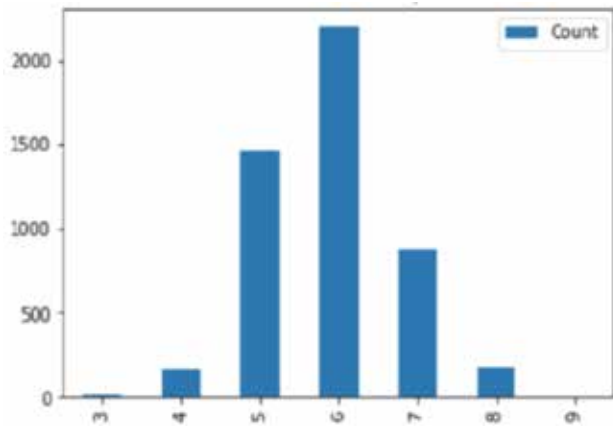


Рис. 3. Розподіл даних за класами для набору даних «Біле вино»

забезпечують не вхідні, а вихідні шари ГШНМ. Для зменшення впливу зазначеного ефекту була розроблена модель навчання, в якій швидкість навчання визначалась на кожному кроці навчання залежно від середнього градієнту шару, що дозволило збільшити швидкість навчання.

Розрахунок значення швидкості навчання  $S_{i,k}$  для кроку навчання  $i$  з шару  $k$  здійснювався за формулою:

$$S_{i,k} = S_{i-1,k} + a_k (g_i G_{i,k} - S_{i-1,k}),$$

де  $a_k$  – коефіцієнт згладжування;  $g_i$  – коефіцієнт приведення градієнту до масштабу швидкості навчання;  $G_{i,k}$  – середнє значення градієнту для кроку  $i$  шару  $k$ .

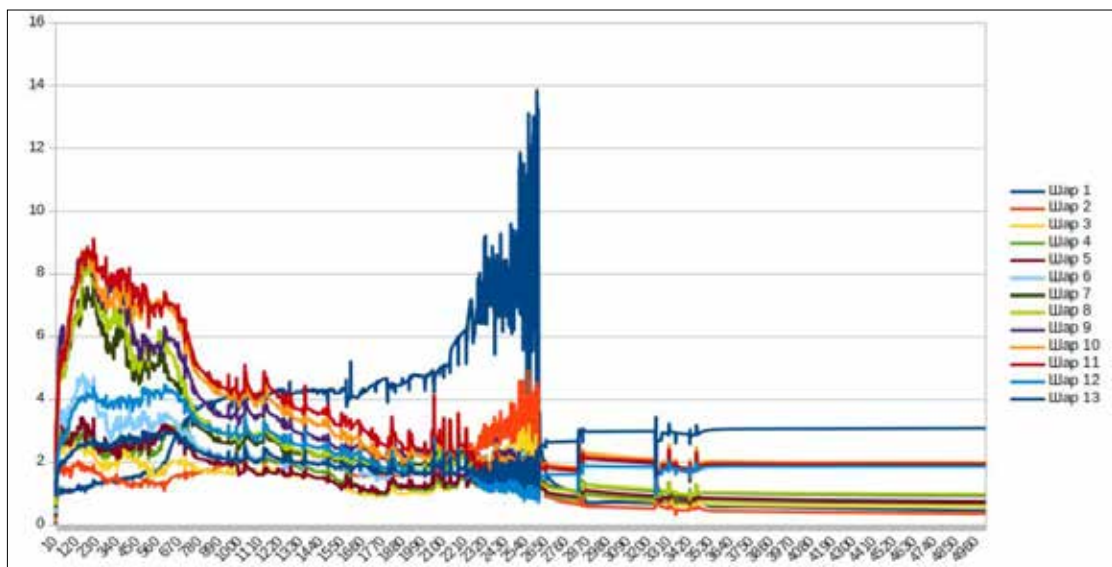


Рис. 4. Розподіл градієнтів даних за шарами при навчанні мережі на наборі даних «Ірисі Фішера»

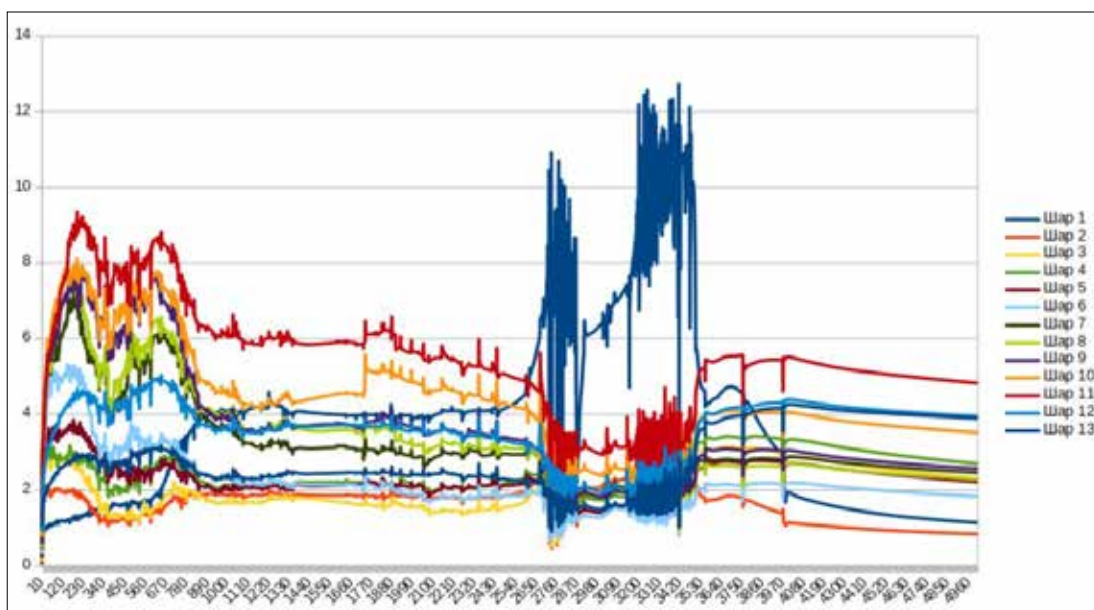


Рис. 5. Розподіл градієнтів даних за шарами при навчанні мережі на наборі даних «Червоне вино»

Встановлення швидкості навчання окремо для кожного шару ШНМ залежно від поточного градієнту шару, дозволило підвищити швидкість навчання і зменшити похибку мережі, але, у свою чергу, часто призводило до швидкого перенавчання мережі. Для запобігання ефекту перенавчання був застосований популярний засіб – алгоритм виключення (dropout).

Розрахунок значення ймовірності виключення  $P_{i,k}$  нейрона з шару  $k$  для кроку навчання  $i$  здійснювався за формулою:

$$P_{i,k} = P \frac{M + G_{i,k}}{M + G_{i-1,k}},$$

де  $P$  – коефіцієнт виключення;  $M$  – стабілізуюча складова для зменшення викидів;  $G_{i,k}$  – середнє значення градієнту для кроку  $i$  шару  $k$ .

На рисунку 7 представлені результати апробації розробленої моделі навчання ГШНМ в прикладній задачі. Як видно з рисунку, запропонована модель дозволила в 3–4 рази покращити точність отриманих результатів порівняно з традиційною моделлю навчання.

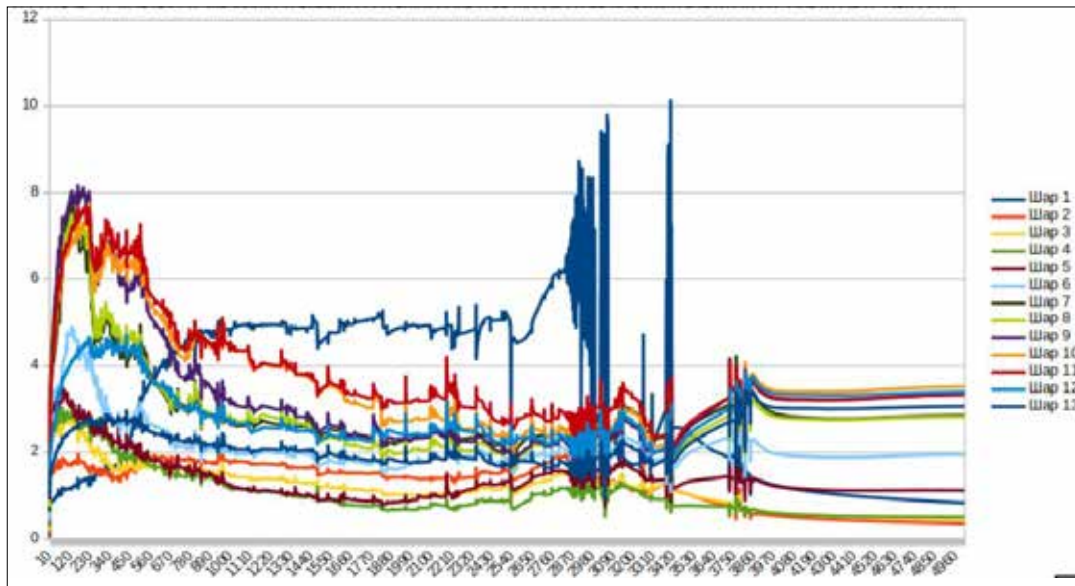


Рис. 6. Розподіл градієнтів даних за шарами при навчанні мережі на наборі даних «Біле вино»

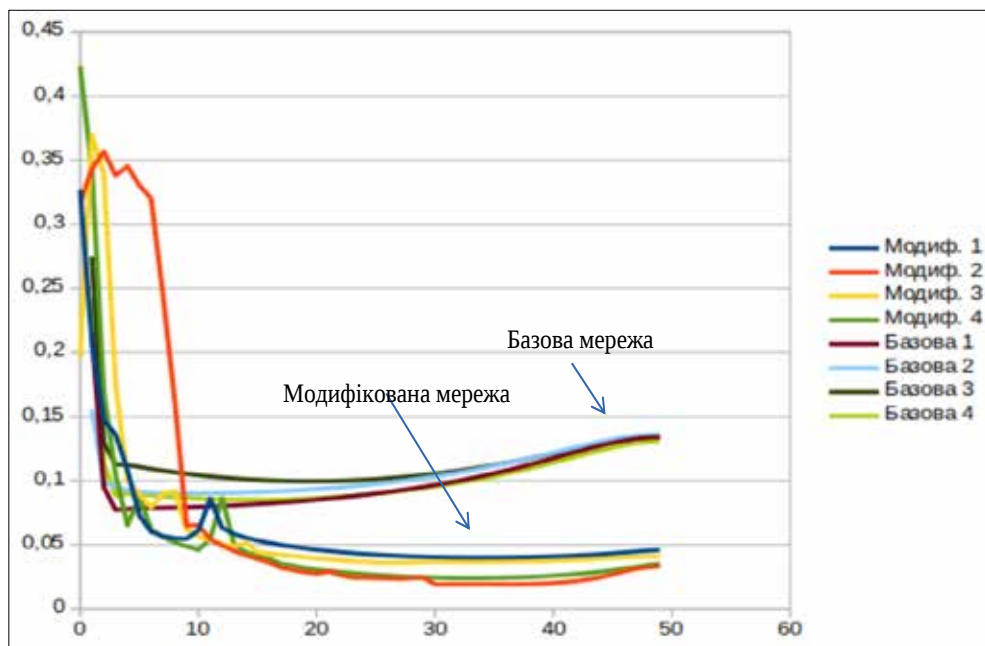


Рис. 7. Значення помилки базової та модифікованої мережі від числа кроків навчання ( $\times 100$ ) для набору даних

**Висновки.** На основі отриманих результатів моделювання можна зробити висновок, проблема зникаючого градієнту повно-зв'язних ГШНМ може бути частково вирішена за рахунок забезпе-

чення деякої «оптимальної» швидкості навчання кожного шару. Побудова моделі «оптимальної» швидкості навчання ШНМ вимагає додаткових досліджень.

#### Список літератури:

1. Hochreiter, S. (1991). *Untersuchungen zu dynamischen neuronalen Netzen* (Diplom thesis). Institut f. Informatik, Technische Univ. Munich.
2. Hochreiter, S.; Bengio, Y.; Frasconi, P.; Schmidhuber, J. (2001). Gradient flow in recurrent nets: the difficulty of learning long-term dependencies / S. C. Kremer, J. F. Kolen. *A Field Guide to Dynamical Recurrent Neural Networks*. IEEE Press. ISBN 0-7803-5369-2.
3. Goh, Garrett B.; Hodas, Nathan O.; Vishnu, Abhinav (15/07/2017). Deep learning for computational chemistry. *Journal of Computational Chemistry* / 1291–1307. Bibcode:2017arXiv170104503G. PMID 28272810. arXiv:1701.04503. doi:10.1002/jcc.24764.
4. Synthetic Minority Over-sampling Technique (SMOTE) for Predicting Software Build Outcomes / Russel Pears, Jacqui Finlay, Andy M. Connor / Cornell University <https://arxiv.org/abs/1407.2330>
5. Гайда А.Ю., Фаріонова Т.А., Ворона М.В. Механізми ефективного управління динамічними системами з нечітко вираженими станами / О.Ю. Гайда, Т.А. Фаріонова, М.В. Ворона. *Інновації у суднобудуванні та океанотехніці* : VII Міжнародна науково-практична конференція. Миколаїв, 2016.
6. Гайда А.Ю. Михелєв І.Л., Морозова Г.С. До проблеми зникаючого градієнту при навчанні глибоких штучних нейронних мереж. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці* : XIV Міжнародна науково-технічна конференція. Миколаїв, 2023.

#### Hayda A.Yu., Morozova H.S. MECHANISM FOR ADAPTIVE TRAINING OF DEEP ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

*Deep learning has recently gained more and more popularity both due to progress in computing technology and due to the demonstration of increasingly successful and convincing results in solving complex problems. Modern artificial neural networks (ANNs), trained on large amounts of data, are able to identify and classify complex images and phenomena, and deep ANNs (ANNs) are also able to recognize internal implicit patterns and connections, evaluate opportunities, make predictions and make decisions. The creation, training and use of such networks requires a comprehensive solution to the problems of data collection and preparation, selection of network architecture and training procedures, etc. One of the problems of learning ANNs is the problem of vanishing gradient, which limits the application of ANNs only to solving problems that either do not require deep learning or are related to data that has spatial or temporal locality.*

*The article examines the problem of the vanishing gradient, which occurs during the training of fully connected GSNs, and presents the results of the analysis of the features of the vanishing gradient, based on the results of which an attempt was made to partially overcome the specified problem by modifying the network learning algorithm. The obtained results made it possible to create and implement the training of fully connected GSHNMs with the number of hidden layers from 5 to 15. The results were tested on academic data sets. The obtained results can be applied in the development of ANN training models.*

**Key words:** artificial neural network, deep artificial neural network, fully connected artificial neural network, artificial neural network learning, vanishing gradient, explosive gradient, “Fisher’s irises”, “Red wine”, “White wine”.

**Головіна Н.В.**

Херсонський національний технічний університет

## РОЗРОБКА НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ ПРИРОДНОГО ХАРАКТЕРУ

*У статті описується процес розробки нейромережової моделі для моніторингу лісових пожеж природного характеру. Модель навчається на наборі даних, який включає супутникові зображення, дані про погоду та дані про місцезнаходження пожеж. Оцінка показала, що модель має високу точність та ефективність у виявленні та прогнозуванні лісових пожеж.*

*Було виявлено та досліджено, що лісові пожежі є серйозною проблемою, яка щорічно завдає значної шкоди довкіллю та економіці. В Україні за останні роки спостерігається значне зростання кількості лісових пожеж. Традиційні методи моніторингу лісових пожеж, такі як спостереження з повітря та наземні патрулі, є трудомісткими та дорогими. Нейромережові моделі мають потенціал стати більш ефективним та економічним інструментом для моніторингу лісових пожеж.*

*У цій роботі було розроблено нейромережову модель для моніторингу лісових пожеж природного характеру. Модель навчається на наборі даних, який включає супутникові зображення, дані про погоду та дані про місцезнаходження пожеж. Для оцінки точності та ефективності моделі буде використовуватися тестовий набір даних.*

*Дослідження виконано з використанням знімків з відкритих джерел NASA Earth Observatory. Для обробки та аналізу супутникових зображень використано бібліотеки Python: Keras, TensorFlow, PyTorch.*

*Після розробки загального алгоритму роботи нейронної мережі було оброблено зображення, враховуючи ключові аспекти, що впливають на виявлення вогню. Для цього були використані такі методи: фільтрація шуму, сегментація зображення, виявлення країв, перетворення кольору, порогове значення, виявлення ключових точок.*

*Було розроблено та описано алгоритм навчання нейронної мережі. Наведено формулу згорткової нейронної мережі. Навчання було проведено за допомогою трьох різних наборів вхідних даних для виявлення найбільш ефективного методу.*

*У першому випадку було використано шумовий фільтр, сегментація зображення та кольорний простір для аналізу зображень та навчання нейронної мережі. У другому випадку було використано фільтр шуму по Гаусу, ключові точки для фільтри для виявлення меж.*

*У наступному випадку було використано всі функції аналізу вхідних зображень для навчання нейронної мережі. Остаточна точність нейронної мережі становить 92 %.*

*Розроблена нейромережева модель показала високу точність та ефективність у виявленні та прогнозуванні лісових пожеж. Вона може бути цінним інструментом для лісового господарства, служб пожежної безпеки та інших організацій, які відповідають за захист лісів.*

**Ключові слова:** нейронні мережі, моніторинг лісових пожеж, супутникові зображення, машинне навчання, обробка зображень, штучний інтелект, згорткова нейронна мережа, обробка зображень.

**Постановка проблеми.** Лісові пожежі є серйозною проблемою, яка щорічно завдає значної шкоди довкіллю та економіці. У 2023 році в Україні сталося понад 1278 лісових пожеж. Зазначена кількість на 21,5 % більша від 2022 року та на 93,6 % більша від 2021 року. Ці пожежі не лише шкодять природі, а й спричиняють значні економічні збитки, пов'язані з втратою деревини, витратами на гасіння пожеж та пошкодженням інфраструктури.

Традиційні методи моніторингу лісових пожеж, такі як спостереження з повітря та наземні

патрулі, є трудомісткими та дорогими. Нейромережові моделі мають потенціал стати більш ефективним та економічним інструментом для моніторингу лісових пожеж. Ці моделі можуть бути навчені на великих обсягах даних, таких як супутникові зображення, дані про погоду та дані про місцезнаходження пожеж, щоб виявляти та прогнозувати лісові пожежі.

Нейромережева модель для моніторингу лісових пожеж природного характеру може бути цінним інструментом для лісового господарства, служб пожежної безпеки та інших організацій, які

відповідають за захист лісів. Вона може допомогти запобігти лісовим пожежам, знизити їх вплив на довкілля та економіку, а також зберегти життя людей.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** За останні роки було проведено значну кількість досліджень з розробки нейромережових моделей для моніторингу лісових пожеж. Ці моделі можуть бути навчені на великих обсягах даних, таких як супутникові зображення, дані про погоду та дані про місцезнаходження пожеж, щоб виявляти та прогнозувати лісові пожежі.

У цьому дослідженні [9] автори розробили нейромережову модель для виявлення лісових пожеж на супутникових зображеннях. Модель досягла точності 95 % на тестовому наборі даних.

У цьому дослідженні [11] автори розробили нейромережову модель для прогнозування поширення лісових пожеж. Модель змогла точно прогнозувати поширення пожеж протягом 24 годин.

У цьому дослідженні [2] автори розробили систему моніторингу лісових пожеж в реальному часі, яка використовує нейромережову модель для виявлення та прогнозування лісових пожеж. Система змогла успішно виявити та відстежити кілька лісових пожеж.

Нейромережові моделі мають великий потенціал для моніторингу лісових пожеж. Ці моделі можуть бути точними, ефективними та доступними, що робить їх цінним інструментом для лісового господарства, служб пожежної безпеки та інших організацій, які відповідають за захист лісів.

**Постановка завдання.** Метою статті є опис методології розробки нейромережової моделі для

моніторингу лісових пожеж природного характеру, а також оцінка її точності та ефективності.

У цій роботі буде розроблена нейромережова модель для моніторингу лісових пожеж природного характеру. Модель буде навчена на наборі даних, який включає супутникові зображення, дані про погоду та дані про місцезнаходження пожеж. Для оцінки точності та ефективності моделі буде використовуватися тестовий набір даних.

Очікується, що розроблена нейромережова модель зможе точно виявляти та прогнозувати лісові пожежі природного характеру. Модель також буде ефективною та економічною, що робить її цінним інструментом для моніторингу лісових пожеж [1].

Дослідження виконано з використанням знімків з відкритих джерел NASA Earth Observatory. Для обробки та аналізу супутникових зображень використано бібліотеки Python: Keras, TensorFlow, PyTorch.

**Виклад основного матеріалу.** Для дослідження кількості пожеж в Україні за роками були використані дані Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС) за період з 2010 по 2022 рік. Дані показують, що загальна кількість пожеж в Україні протягом досліджуваного періоду має тенденцію до зростання. Найбільша кількість пожеж спостерігалась у 2015 році (114 701 пожежа), 2020 році (80 654 пожежі) та 2022 році (102 376 пожеж). Найменша кількість пожеж спостерігалась у 2012 році (44 821 пожежа) та 2017 році (45 408 пожеж). На рис. 1 можна побачити загальну статистику по кількості лісових пожеж на території України за останні роки [12].



Рис. 1. Кількість лісових пожеж в Україні з 2010 по 2022 роки

Набір даних складається з необроблених зображень, які класифікуються як «пожежа», «відсутність пожежі» або «початок пожежі». Ці зображення потребують додаткової обробки перед використанням для навчання моделі.

Зображення обробляються таким чином, щоб відповідати формату моделі та забезпечити точне прогнозування лісових пожеж. Цей процес включає масштабування, нормалізацію та інші методи обробки зображень [13–16].

Оброблені зображення використовуються для навчання згорткової нейронної мережі. Для економії ресурсів та збереження обчислювальних потужностей застосовуються попередньо навчені ваги, які потім донавчаються на новому наборі даних.

Навчена модель отримує нове зображення як вхідні дані та прогнозує ймовірність пожежі для кожного класу. Навчання моделі здійснюється за допомогою наборів даних. Моделі для перевірки використовуються для оцінки точності навчання. Після перевірки модель проходить оцінку, щоб отримати кінцевий результат та оптимізувати продуктивність алгоритму. На рис. 2 зображено алгоритм роботи нейронної мережі.

Після розробки загального алгоритму роботи нейронної мережі потрібно було обробити зображення, враховуючи ключові аспекти, що впливають на виявлення вогню. Для цього були використані такі методи: фільтрація шуму, сегментація зображення, виявлення країв, перетворення кольору, порогове значення, виявлення ключових точок. Усі ці параметри дозволяють виявити ключові елементи лісової пожежі. Таким чином, для навчання моделі були підготовлені дані.

При проведенні дослідження було об'єднано кілька функцій. Різні комбінації надали можливість виявити найбільш ефективні методи навчання нейронної мережі.

Алгоритм згорткової нейронної мережі виглядає наступним чином:

$$A_{ij} = \sum \sum w_{kl} * X_{(i-k),j-l}$$

де

- 1)  $A_{ij}$  – елемент карти ознак на позиції  $(i, j)$ .
- 2)  $w_{kl}$  – значення ваги на позиції  $(k, l)$  в ядрі згортки.
- 3)  $X_{(i-k),j-l}$  – значення елемента вхідної сітки на позиції  $(i-k, j-l)$ .
- 4)  $k$  і  $l$  – розміри ядра згортки.

Після згортки до карти ознак застосовується нелінійна функція активації, яка вводить елемент нелінійності в процес обробки.

У рамках дослідження було перевірено кілька випадків навчання нейронної мережі. Нижче представлено три різних способи з комбінацією окремих методів аналізу зображень [3–8].

У першому випадку (рис. 3) було використано шумовий фільтр, сегментація зображення та колірний простір для аналізу зображень та навчання нейронної мережі. Можна помітити, що точність результатів складає всього 77,23 %.

У другому випадку (рис. 4) було використано фільтр шуму по Гаусу, ключові точки для фільтри для виявлення меж. Можна помітити різкі переходи точності кривих при навчанні та перевірці алгоритму. Точність навчання зростає поступово. Оцінка точності даного алгоритму склала 77 %.

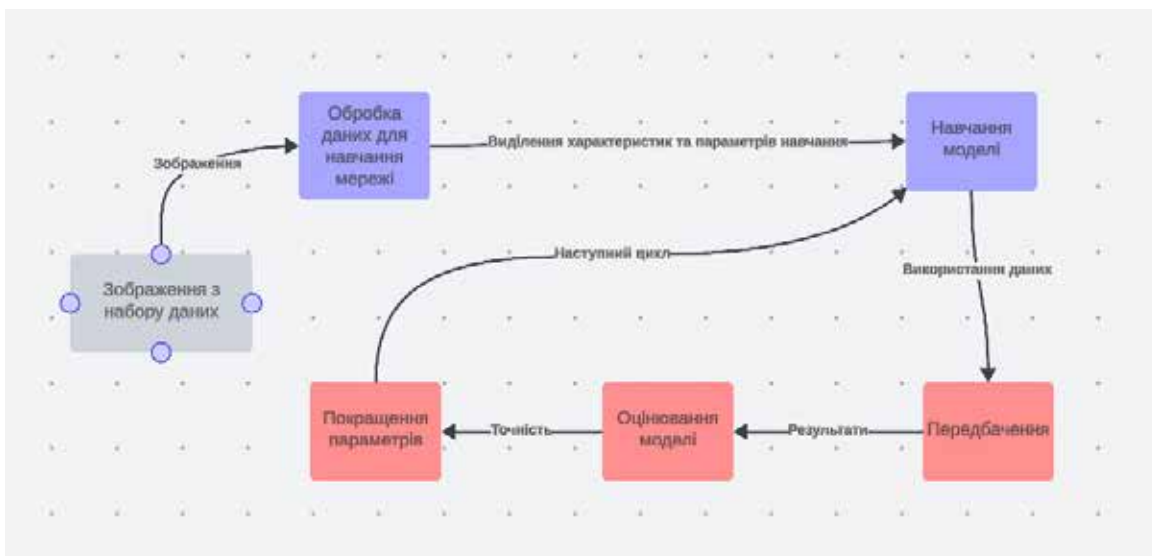


Рис. 2. Алгоритм роботи нейронної мережі

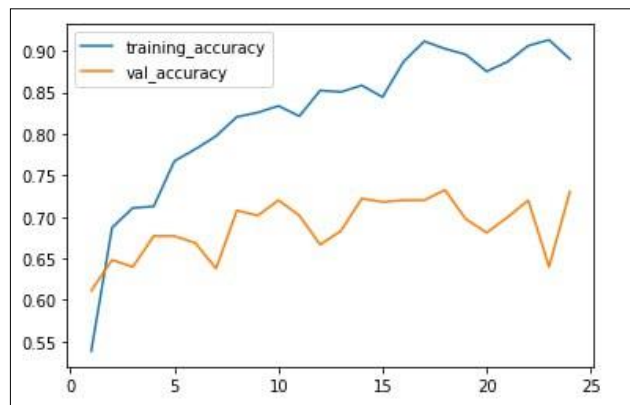


Рис. 3. Крива точності навчання нейронної мережі у першому випадку

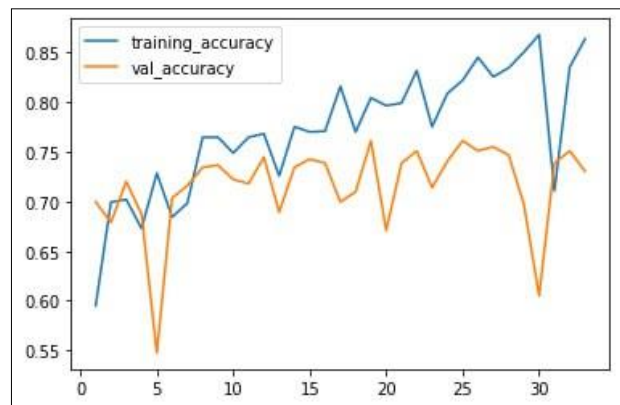


Рис. 4. Крива точності навчання нейронної мережі у другому випадку

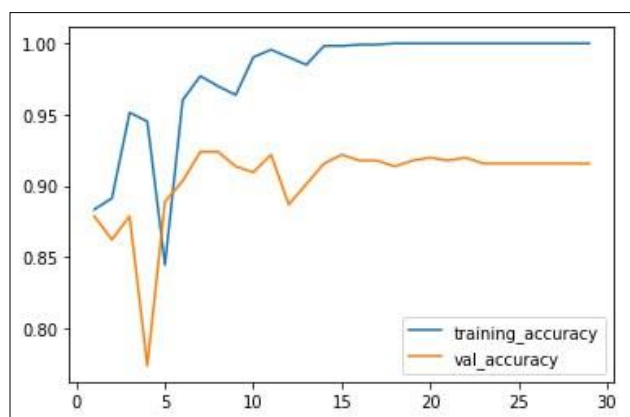


Рис. 5. Крива точності навчання нейронної мережі у третьому випадку

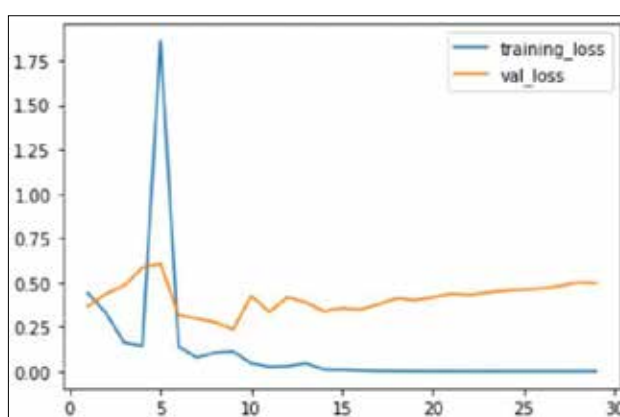


Рис. 6. Крива втрат

У наступному випадку було використано всі функції аналізу вхідних зображень для навчання нейронної мережі. На рис. 5 можна побачити, що остаточна модель має високий рівень точності у порівнянні з попередніми варіантами. Точність становить 92 %. Спочатку результати навчання змінюються по кривій, але потім точність вирівнюється.

У результаті навчання нейронної мережі за допомогою всіх методів аналізу зображення було оцінено точність навчання у порівнянні з усіма попередніми моделями. На кривій втрат (рис. 6) можна побачити, що спочатку рівень

помилки високий, але з часом ця крива вирівнюється [10].

**Висновки.** У даній статті було описано процес розробки нейромережевої моделі для моніторингу лісових пожеж природного характеру. Модель була навчена на наборі даних, який включає супутникові зображення. Оцінка показала, що модель має високу точність та ефективність у виявленні та прогнозуванні лісових пожеж. Результати даного дослідження будуть корисні для розробки повноцінної системи прийняття рішень для гасіння лісових пожеж та попередження надзвичайних ситуацій природного характеру.

#### Список літератури:

1. Ardito, L., Petruzzelli, A. M., Panniello, U., & Garavelli, A. C. (2019). Towards Industry 4.0 Mapping digital technologies for supply chain management-marketing integration. *Business Process Management Journal*, 25 (2, SI), P. 323–346. <https://doi.org/10.1108/BPMJ-04-2017-0088>.
2. A. Sheryl Oliver; U. Ashwanthika; R. Aswitha. Detection of Forest Fire using Convolutional Neural Networks. *7th International Conference on Smart Structures and Systems (ICSSS)*. 2020. <https://doi.org/10.1109/ICSSS49621.2020.9202200>.
3. Barthe-Delanoë A.M. Event-driven agility of interoperability during the Run-time of collaborative processes. *Decision Support Systems*, 2014.



4. Bingsong He, Xueping Zhao, Zhiguo Zhou and Zheyi Fan. Implementation of a Fire Detection Algorithm on TMS320DM642 DSP using MATLAB/Simulink. [Електронний ресурс] URL: [https://www.researchgate.net/publication/266646537\\_Implementation\\_of\\_a\\_Fire\\_Detection\\_Algorithm\\_on\\_TMS320DM642\\_DSP\\_using\\_MATLABSimulink](https://www.researchgate.net/publication/266646537_Implementation_of_a_Fire_Detection_Algorithm_on_TMS320DM642_DSP_using_MATLABSimulink) (дата доступу: 10.04.2024).
5. Elia G., Polimeno G., Solazzo G., Passiante G.. A multi-dimension framework for value creation through big data, 2019.
6. Hayes D.R., Cappa F. Open-source intelligence for risk assessment, 2018.
7. Jeble S., Kumari S, Patil Y.. Role of Big Data in Decision Making. Operations and Supply Chain Management: An International Journal, 2018.
8. Oger R. Towards Decision Support Automation for Supply Chain Risk Management among Logistics Network Stakeholders. IFAC-PapersOnLine, 2018.
9. R. Shanmuga Priya; K. Vani. Deep Learning Based Forest Fire Classification and Detection in Satellite Images. 11th International Conference on Advanced Computing (ICoAC), 2019. <https://doi.org/10.1109/ICoAC48765.2019.246817>.
10. Simões-Marques, M., Figueira, J.R. How Can AI Help Reduce the Burden of Disaster Management Decision-Making?; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2018.
11. Y. Safi, A. Bouroumi. Prediction of forest fires using Artificial neural networks. *Appl. Math. Sci.* Vol. 7. 2013, no. 5-8, 271-286. <https://doi.org/10.12988/ams.2013.13025>.
12. Борючись із лісовою пожежею та пандемією, Україна стикається з новим ворогом: наземними мінами. [Електронний ресурс] URL: <https://www.nytimes.com/2020/10/03/world/europe/ukraine-wildfires-landmines.html> (дата звернення: 10.04.2024).
13. Журавль І.М. Короткий курс теорії обробки зображень. [Електронний ресурс] URL: <https://hub.exponenta.ru/post/kratkiy-kurs-teorii-obrabotki-izobrazheniy734> (дата звернення: 10.04.2024).
14. Кветний Р.Н., Богач І.В., Бойко О.Р., Софіна О.Ю., Шушура О.М. Комп'ютерне моделювання систем і процесів. Методи обробки. Частина 2. [Електронний ресурс]. URL: [https://web.posibnyku.vntu.edu.ua/fksa/2kvetnyj\\_komp%27yuterne\\_modelyuvannya\\_system\\_procesiv/t2/zm2..htm](https://web.posibnyku.vntu.edu.ua/fksa/2kvetnyj_komp%27yuterne_modelyuvannya_system_procesiv/t2/zm2..htm) (дата звернення: 10.04.2024).
15. Пітак І.В., Негадайлов А.А., Масікевич Ю.Г., Пляцук Л.Д., Шапорев В.П., Моїсєєв В.Ф. Геоінформаційні технології в екології. – Чернівці, 2012. – 273 с. [Електронний ресурс] URL: [https://geology.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2020/04/Ekologichna-heoinformatyka\\_literatura-dlia-lektsiy.pdf](https://geology.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2020/04/Ekologichna-heoinformatyka_literatura-dlia-lektsiy.pdf) (дата звернення: 10.04.2024).
16. Тургай Челік. Швидкий і ефективний метод виявлення пожежі за допомогою обробки зображень. [Електронний ресурс]. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.4218/etrij.10.0109.0695> (дата звернення: 10.04.2024).

## Holovina N.V. DEVELOPMENT OF A NEURAL NETWORK MODEL FOR MONITORING OF NATURAL FOREST FIRES

*The article describes the process of developing a neural network model for monitoring natural forest fires. The model is trained on a dataset that includes satellite imagery, weather data, and fire location data. The evaluation showed that the model has high accuracy and efficiency in detecting and forecasting forest fires.*

*Forest fires have been identified and researched as a serious problem that causes significant environmental and economic damage every year. In recent years, there has been a significant increase in the number of forest fires in Ukraine. Traditional methods of forest fire monitoring, such as aerial surveillance and ground patrols, are time-consuming and expensive. Neural network models have the potential to become a more efficient and cost-effective tool for forest fire monitoring.*

*In this work, a neural network model was developed for monitoring natural forest fires. The model is trained on a dataset that includes satellite imagery, weather data, and fire location data. A test dataset will be used to evaluate the accuracy and performance of the model.*

*The study was carried out using images from the open sources of the NASA Earth Observatory. The Python libraries Keras, TensorFlow, PyTorch were used to process and analyze satellite images.*

*After developing a general neural network algorithm, the image was processed taking into account key aspects affecting fire detection. For this, the following methods were used: noise filtering, image segmentation, edge detection, color transformation, thresholding, key point detection.*

*A neural network learning algorithm was developed and described. The formula of a convolutional neural network is given. Training was performed using three different input data sets to identify the most effective method.*

*In the first case, a noise filter, image segmentation and color space were used for image analysis and neural network training. In the second case, a Gaussian noise filter was used, key points for edge detection filters.*

*In the following case, all input image analysis functions were used for neural network training. The final accuracy of the neural network is 92 %.*

*The developed neural network model showed high accuracy and efficiency in detecting and forecasting forest fires. It can be a valuable tool for forestry, fire protection services and other organizations responsible for forest protection.*

**Key words:** *neural networks, forest fire monitoring, satellite imagery, machine learning, image processing, artificial intelligence, convolutional neural network, image processing.*

**Горбань Г.В.**

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

**Козачок Ю.А.**

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

## ВИКОРИСТАННЯ ІНСТРУМЕНТІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В РОЗРОБЦІ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ БІБЛІОТЕКОЮ

*Штучний інтелект відкриває нові можливості та перспективи вдосконалення технік та методів розробки програмних продуктів. Адже він може підвищити ефективність та якість розробки програмного забезпечення за рахунок оптимізації процесів. У статті подано дослідження найбільш перспективних напрямків в галузі штучного інтелекту, як інструменту для оптимізації розробки програмного забезпечення. В ході роботи досліджено сучасні роботи, присвячені висвітленню теми використання штучного інтелекту в розробці програмного забезпечення. Також проведено аналіз можливості використання інструменту чат-бот ChatGPT при написанні програмного коду. Окрім того, проаналізовано та висвітлено основні можливості ChatGPT, які дають змогу автоматизувати та оптимізувати багато етапів розробки програмного продукту. В результаті проведеного аналізу було виконано практичне дослідження використання ChatGPT, а саме виконана розробка частини інформаційної системи управління бібліотекою. Була побудована архітектура інформаційної системи з трьох рівнів: DAO (data access object), service layer, API (REST, gRPC). Кожен рівень було реалізовано з використанням штучного інтелекту, а саме за допомогою інструменту ChatGPT. Перший рівень DAO було написано на мові програмування Java з використанням бази даних Postgres в середовищі програмування IntelliJ IDEA. Наступним кроком було згенеровано декілька Java entities на основі sql-схеми, яка також побудована за допомогою ChatGPT. Кінцевим етапом побудови інформаційної системи була генерація REST API для інформаційної системи управління бібліотекою з використанням ChatGPT для демонстрації можливостей штучного інтелекту. В результаті практичного дослідження було проаналізовано якість програмного коду та оптимізовано програмний код за допомогою ChatGPT. Виділено основні переваги застосування ChatGPT розробниками для написання програмного коду та визначено основні проблеми, які потребують подальших досліджень.*

**Ключові слова:** штучний інтелект, chatGPT, розробка програмного забезпечення, технології, генерація програмного коду, автоматизація.

**Постановка проблеми.** Використання штучного інтелекту та машинного навчання може виявитися важливим напрямком для підвищення ефективності створення програмних продуктів. Дослідження в цьому напрямку стають все більш актуальними, оскільки з збільшенням попиту на використання штучного інтелекту в створенні програмних продуктів, розробники знаходять нові можливості використання штучного інтелекту для спрощення та прискорення процесу створення програмного продукту.

Отже, велика увага в дослідженні може бути приділена визначенню оптимальних стратегій використання штучного інтелекту під час розробки програмного забезпечення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні дослідники та молоді науковці, такі як

Д. Пчелянський, С. Воїнова [8, с. 60], Т. Савчук [6, с. 30], С. Шаров, С. Хрустальов [10, с. 109] висвітлили тему використання штучного інтелекту в розробці програмного забезпечення. В роботах досліджено використання штучного інтелекту для прогнозування часу на виправлення дефектів програмного коду, також проведено аналіз інструментів для використання при написанні програмного коду. В результаті аналізу було встановлено, що інструменти ВІТО та ChatGPT можуть бути корисними при розробці програмного забезпечення, проте в роботах не були розглянуті існуючі рішення для їх практичного впровадження у процес написання програмного коду.

Виконаний аналіз демонструє, що використання штучного інтелекту в розробці програмних продуктів є актуальним напрямом досліджень,

але інструменти, які можна використовувати в цьому напрямку, потребують подальшого аналізу на застосування у використанні.

**Постановка завдання.** Метою цього дослідження є створення інформаційної системи управління бібліотекою з використанням штучного інтелекту, зокрема інструменту ChatGPT. Використання інформаційної системи, заснованої на використанні асистенту ChatGPT, має потенціал прискорити розробку та ітеративно оптимізувати бізнес-процеси.

Основні задачі, які вирішуються для досягнення заявленої мети:

- 1) провести дослідження як треба вести спілкування з чат ботом для правильної генерації коду;
- 2) розробити частину програмного забезпечення для демонстрації можливостей штучного інтелекту;
- 3) проаналізувати якість написаного коду.

**Виклад основного матеріалу.** Штучний інтелект відкрив нові перспективи у сфері програмної інженерії, вносячи нові методики у процес розробки програмного забезпечення. Це дозволяє автоматизувати та оптимізувати багато етапів розробки, включаючи виявлення помилок, вибір алгоритмів та побудову архітектурних рішень. Одним із дієвих інструментів для розробки програмного коду є чат бот ChatGPT.

Під час дослідження було встановлено, що ChatGPT є ефективним інструментом для програмістів [13]. Він використовує нейронні мережі та алгоритми машинного навчання для автоматизації рутинних завдань, таких як виявлення помилок у коді, оптимізація алгоритмів та прискорення вирішення задач. Розробники можуть використовувати ChatGPT в браузері або інтегрувати з IDE, що також дозволяє отримувати пропозиції та рішення у режимі реального часу під час написання коду. До основних можливостей ChatGPT відносяться: написання програмного коду, підтримка з синтаксису, оптимізація та роз'яснення програмного коду, перевірка безпеки.

Розглянемо використання чат боту ChatGPT в розробці інформаційної системи (ІС) управління бібліотекою. Будь-яка enterprise ІС складається з трьох рівнів: DAO (data access object), service layer, API (REST, gRPC). Пояснивши штучному інтелекту, що саме необхідно згенерувати, можна отримати допомогу в генерації DAO структури даних під будь-яку мову програмування, включаючи Python, JavaScript, Java, C++, PHP, Ruby та інші.

Розглянемо створення DAO на мові Java з використанням бази даних Postgres в середовищі програмування IntelliJ IDEA. Штучний інтелект генерує sql-код (рис. 1), який готовий до використання та напише пояснення до даної схеми (рис. 2).

You  
Implement sql sqema for POSTGRES for library for storage books

ChatGPT  
Below is an example SQL schema for a library database using PostgreSQL:

```

sql
Copy code

CREATE TABLE Authors (
  author_id SERIAL PRIMARY KEY,
  author_name VARCHAR(100) NOT NULL
);

CREATE TABLE Books (
  book_id SERIAL PRIMARY KEY,
  title VARCHAR(255) NOT NULL,
  author_id INT,
  publication_year INT,
  genre VARCHAR(100),
  isbn VARCHAR(20),
  available_copies INT,
  FOREIGN KEY (author_id) REFERENCES Authors(author_id)
);

CREATE TABLE Users (
  user_id SERIAL PRIMARY KEY,
  username VARCHAR(100) NOT NULL,
  email VARCHAR(255) UNIQUE NOT NULL,
  password VARCHAR(255) NOT NULL,
  role VARCHAR(50) NOT NULL
);
    
```

Рис. 1. Генерація sql-коду за допомогою ChatGPT

This schema includes the following tables:

- **Authors:** Stores information about authors.
- **Books:** Stores information about books including title, author, publication year, genre, ISBN, and available copies. It has a foreign key relationship with the Authors table.
- **Users:** Stores information about library users including username, email, password, and role.
- **Loans:** Tracks the loans of books to users, including issue date, return date, and status. It has foreign key relationships with the Users and Books tables.
- **Reviews:** Stores user reviews of books including rating and comments. It has foreign key relationships with the Users and Books tables.

Рис. 2. Пояснення до sql-коду, згенероване за допомогою ChatGPT

Отримавши згенеровану схему, ми можемо вручну вносити корективи або надавати чату вказівки щодо того, які зміни необхідно зробити. Чат в свою чергу може згенерувати нову схему на основі цих вказівок. Таким чином, ми забезпечу-

ємо зручний ітераційний процес, де можливість ручного втручання поєднується з автоматизованим створенням схеми.

Наступним кроком згенеруємо Java entity Author та Book на основі sql-схеми (рис. 3, 4).

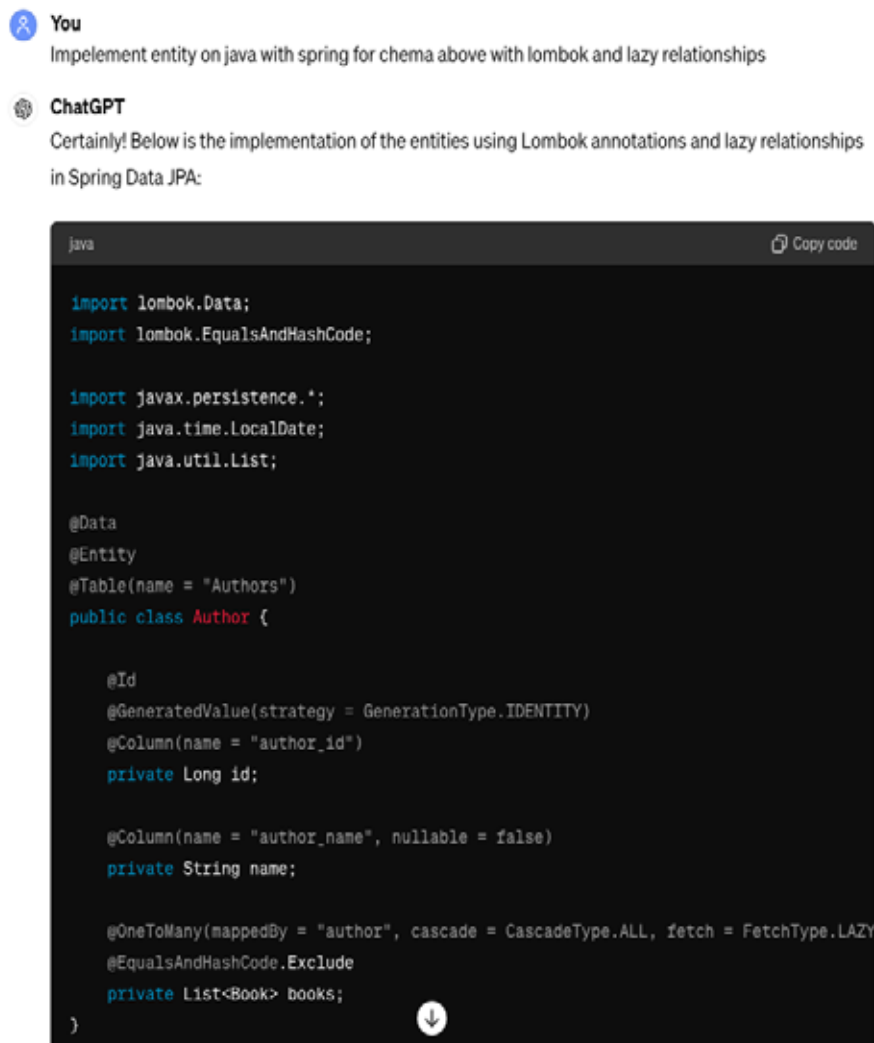


Рис. 3. Генерація Java entity Author на основі sql-схеми

```

@Data
@Entity
@Table(name = "Books")
public class Book {

    @Id
    @GeneratedValue(strategy = GenerationType.IDENTITY)
    @Column(name = "book_id")
    private Long id;

    @Column(name = "title", nullable = false)
    private String title;

    @ManyToOne(fetch = FetchType.LAZY)
    @JoinColumn(name = "author_id")
    private Author author;

    @Column(name = "publication_year")
    private Integer publicationYear;

    @Column(name = "genre")
    private String genre;

    @Column(name = "isbn")
    private String isbn;

    @Column(name = "available_copies")
    private Integer availableCopies;
}

```

Рис. 4. Генерація Java entity Book на основі sql-схеми

У сфері реалізації бізнес-логіки використання штучного інтелекту відкриває широкі можливості для оптимізації та рефакторингу коду з метою підвищення продуктивності та ефективності системи. Цей підхід охоплює не лише виправлення недоліків, а й оптимізацію алгоритмів та застосування інших методів для покращення якості коду.

Розглянемо використання цього підходу на прикладі Java методу оцінки рівня цікавості книги (рис. 5). Можна зауважити, що оптимізація даного Java методу за допомогою штучного інтелекту передбачає чітку вказівку користувача що саме треба зробити. Штучний інтелект не зможе визначити це самостійно. Це може бути аналіз різноманітних параметрів, що впливають на цікавість книги для користувача або ж рефакторинг коду для покращення підтримки даної логіки. Серед таких параметрів можуть бути:

**1. Аналіз вмісту книги.** Використання методів обробки природної мови (Natural Language Processing, NLP) для аналізу тексту книги з метою виявлення ключових тематик, стилю письма, а також визначення рівня складності тексту.

**2. Історія читання користувача.** Збір та аналіз історії читання кожного конкретного користувача для визначення його індивідуальних уподобань та відповідності цікавості певній книзі.

**3. Відгуки та рейтинги.** Аналіз відгуків користувачів та їх рейтингів книги для визначення загального сприйняття та оцінки цікавості.

**4. Зовнішні дані.** Використання зовнішніх даних, таких як популярність книги, рейтинги на платформах, соціальні мережі тощо, для уточнення оцінки цікавості.

Рисунок 6 демонструє, як даний програмний код можна оптимізувати з використанням чат боту штучного інтелекту.

Фінішним кроком є генерація REST API за допомогою штучного інтелекту на основі вже згенерованих DAO (data access object) та service layer. Згенеруємо REST API для вже оптимізованого Java методу оцінки рівня цікавості книги (рис. 7).

Отриманий програмний код можна використовувати в подальшій побудові архітектури ІС управління бібліотекою та використовувати ChatGPT для генерації інших DAO, service layers та необхідних REST API для покриття бізнес-цілей ІС.

**Висновки.** В рамках даної роботи було:

1. Досліджено процес спілкування з чат ботом ChatGPT для правильної генерації коду. Наведено опис можливостей чат боту ChatGPT при написанні програмного коду.

2. Розроблено DAO, service layer та REST API для ІС управління бібліотекою з використанням

```
@Service
public class BookReviewService {

    @Autowired
    private ReviewRepository reviewRepository;

    @Transactional
    public boolean isBookInteresting(Book book) {
        List<Review> reviews = reviewRepository.findByBook(book);
        if (reviews.isEmpty()) {
            return false;
        }

        int totalRating = 0;
        for (Review review : reviews) {
            totalRating += review.getRating();
        }

        double averageRating = (double) totalRating / reviews.size();
        return averageRating >= 4.0;
    }
}
```

Рис. 5. Функція оцінки рівня цікавості книги

- You**  
optimise the class above. The book will be interesting if score more then 4.2. Please, use constants for score and Use constructor injection
- ChatGPT**  
Certainly! Here's the optimized version of the class using constructor injection and constants for the score threshold:

```
java Copy code

import org.springframework.beans.factory.annotation.Autowired;
import org.springframework.stereotype.Service;
import org.springframework.transaction.annotation.Transactional;

@Service
public class BookReviewService {


    private final ReviewRepository reviewRepository;
    private static final double INTERESTING_SCORE_THRESHOLD = 4.2;

    @Autowired
    public BookReviewService(ReviewRepository reviewRepository) {
        this.reviewRepository = reviewRepository;
    }

    @Transactional(readOnly = true)
    public boolean isBookInteresting(Book book) {
        Double averageRating = reviewRepository.getAverageRatingByBookId(book.getId());
        return averageRating != null && averageRating >= INTERESTING_SCORE_THRESHOLD;
    }
}
```

Рис. 6. Оптимізований програмний код за допомогою ChatGPT

 **You**  
generate Spring REST endpoint for the method above

 **ChatGPT**  
To generate a Spring REST endpoint for the `isBookInteresting` method, you can create a controller class that maps a HTTP GET request to a specific URL. Here's how you can implement it:

```

java Copy code

import org.springframework.beans.factory.annotation.Autowired;
import org.springframework.web.bind.annotation.GetMapping;
import org.springframework.web.bind.annotation.PathVariable;
import org.springframework.web.bind.annotation.RequestMapping;
import org.springframework.web.bind.annotation.RestController;

@RestController
@RequestMapping("/api/books")
public class BookController {

    private final BookReviewService bookReviewService;

    @Autowired
    public BookController(BookReviewService bookReviewService) {
        this.bookReviewService = bookReviewService;
    }

    @GetMapping("/{bookId}/interesting")
    public boolean isBookInteresting(@PathVariable Long bookId) {
        Book book = bookRepository.findById(bookId).orElseThrow(() -> new BookNotFoundException());
        return bookReviewService.isBookInteresting(book);
    }
}

```

Рис. 7. Згенерований REST API за допомогою ChatGPT

ChatGPT для демонстрації можливостей штучного інтелекту.

3. Проаналізовано якість написаного програмного коду. В рамках цього завдання було оптимізовано програмний код за допомогою ChatGPT.

Загалом, ChatGPT може стати важливим інструментом для розробників програмного коду, вносячи новаторські можливості у галузь штучного інтелекту. Спілкуючись с ChatGPT

можна казати свої побажання та оптимізувати бізнес-логіку до потреб замовника, але для високого рівня оптимізації необхідно мати експертизу в бізнес-процесі та мові програмування. Для досягнення значних покращень у якості та ефективності розробки програмного забезпечення необхідна взаємодія між фахівцями з бізнес-аналізу, розробниками та експертами у сфері штучного інтелекту.

#### Список літератури:

1. Амосов Н. М. Алгоритми розуму. Київ : Наук. думка, 1979. 223 с.
2. Бурдаев В. П. Системи навчання з елементами штучного інтелекту : монографія. Харків : ХНЕУ, 2009. 392 с.
3. Jain A., Mao J., Mohiuddin K. Artificial Neural Networks : *A Tutorial*. *IEEE*. 1996. Vol. 29, no 3. P. 31–44.
4. Bito – дозволяє легко писати код – AI Guru. AI Guru. URL: <https://aiguru.com.ua/pysaty-kod-za-dopomohoyu-shtuchnoho-intelektu/> (дата звернення: 07.05.2024).
5. Bito AI – Become a 10X Dev with Bito. Bito. URL: <https://bito.ai/> (date of access: 07.05.2024).
6. Савчук Т., Приймак Н. Використання методів штучного інтелекту для прогнозування часу для виправлення дефектів розробки програмного забезпечення. Вінниця : Інтернет-Освіта-Наука, 2016. С. 30–31.

7. Weizenbaum J. Computer power and human reason: From judgment to calculation. Freeman, 1976
8. Пчелянський Д. П., Воїнова С. А. Штучний інтелект: перспективи та тенденції розвитку. *Automation of technological and business processes*. 2019. Т. 11. № 3. С. 59–64.
9. Шаров С., Хрустальов С. Інструментальні засоби та етапи розробки експертних систем. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2016. Т. 49. № 4. С. 105–109.
10. Mougouei D., Powers D. M. W., Mougouei E. A fuzzy framework for prioritization and partial selection of security requirements in software projects. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*. 2019. Vol. 37. № 2. P. 2671–2686.
11. Сівіцький В. ВІТО – ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ ДЛЯ ДОПОМОГИ РОЗРОБНИКАМ ПРОГРАМНОГО КОДУ. *Збірник наукових праць Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця* 2024. Т. 15. С. 95–97.
12. Використання ChatGPT для сценаріїв розробки програмного забезпечення – рішення Visure. *Visure Solutions*. URL: <https://visuresolutions.com/uk/blog/leveraging-ai-for-use-cases-in-software-development/> (дата звернення: 13.05.2024).

### **Horban H.V., Kozachok Yu.A. ARTIFICIAL INTELLIGENCE TOOLS USAGE IN THE DEVELOPMENT OF THE LIBRARY MANAGEMENT INFORMATION SYSTEM**

*Artificial intelligence opens up new opportunities and perspectives for improving techniques and methods of software development. It can enhance the efficiency and quality of software development by optimizing processes. The article presents research on the most promising directions in the field of artificial intelligence as a tool for optimizing software development. Modern works dedicated to the use of artificial intelligence in software development are examined. An analysis of the possibility of using the ChatGPT chatbot tool in writing software code is also conducted. Additionally, the main capabilities of ChatGPT are analyzed and highlighted, allowing for the automation and optimization of many stages of software product development. As a result of the analysis, a practical study of the use of ChatGPT was conducted, namely the development of a part of the library management information system. The architecture of the information system was built on three levels: DAO (data access object), service layer, API (REST, gRPC). Each level was implemented using artificial intelligence, specifically with the help of the ChatGPT tool. The first DAO level was written in Java using the Postgres database in the IntelliJ IDEA programming environment. The next step involved generating several Java entities based on the SQL schema, which was also built using ChatGPT. The final stage of building the information system was the generation of a REST API for the library management information system using ChatGPT to demonstrate the capabilities of artificial intelligence. As a result of the practical study, the quality of the software code was analyzed and the software code was optimized using ChatGPT. The main advantages of using ChatGPT by developers to write software code were identified, and the main problems requiring further research were highlighted.*

**Key words:** artificial intelligence, chatGPT, software development, technology, code generation, automation.



**Жученко Л.К.**

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

## СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ВИПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ

*Вуглеграфітові матеріали відіграють важливу роль у різних галузях промисловості України: хімічній та електротехнічній, чорній та кольоровій металургії, машинобудуванні та інших. Якість вуглеграфітових виробів безпосередньо залежить від процесу їх виготовлення. Одним з визначальних етапів виробництва є процес випалювання вуглеграфітових виробів, який характеризується значною енерго- та ресурсозатратністю. Ефективним методом розв'язання задачі енергозбереження та забезпеченні потрібної якості кінцевої продукції у процесі випалювання є створення сучасної системи керування даним процесом.*

*У статті показано, що для забезпечення потрібної якості вуглецевих виробів у процесі випалювання необхідно розв'язати дві задачі: запобігти перевищенню допустимого перепаду температур у заготовці та забезпечити потрібну тривалість процесу випалювання. Наведені результати дослідження зв'язку між даними показниками свідчать, що величина допустимого максимального перепаду температур суттєво впливає на тривалість процесу випалювання, а значить, і на його загальну продуктивність.*

*У статті запропонована система керування процесом випалювання вуглецевих виробів реального часу, яка розв'язує поставлені задачі, а також дозволяє враховувати поточні збурення, діючи в процесі випалювання та забезпечує оптимальне керування технологічним процесом після його зупинки, викликаній аварійними ситуаціями (наприклад, відключенням електроживлення).*

*Визначальним технологічним режимом процесу випалювання є температурний режим його роботи. Для оптимального керування температурним режимом даного процесу використовується лінійно-квадратичний регулятор. У критерій оптимальності системи керування включені три складові, які забезпечують: дотримання заданого температурного режиму у нижній точці заготовки з найменшою температурою, яка знаходиться у холодній зоні печі випалювання, запобігання перевищенню максимально допустимого перепаду температур у заготовці з найбільшою температурою у гарячій зоні печі та економію витрат палива.*

**Ключові слова:** випалювання, температурний режим, перепад температур, тривалість процесу, система керування, лінійно-квадратичний регулятор.

**Постановка проблеми.** Починаючи з 50-тих років минулого століття, схема технологічного процесу випалювання майже не змінилась та являє собою нагрівання заготовок від початкової температури до кінцевої температури випалювання за заданим графіком зі швидкістю, яка визначається набором фізико-хімічних властивостей виробів, які необхідно отримати. При цьому весь перебіг процесу визначається оператором-технологом наперед на основі власного досвіду та статистичних даних, накопичених на попередніх кампаніях випалювання, і залишається незмінним на протязі всієї поточної кампанії. Після розміщення горілки на черговій камері (після чого камера стає «камерою під вогнем») для забезпечення максимальної продуктивності виробництва процес випалювання триває певний час при максимальній витраті палива. При цьому, як свідчить практика, об'єктивно існуючі помилки у технологічній реалізації перебігу

процесу та його тривалості призводять, з одного боку, до перевитрат енергоносіїв, а з іншого боку – до значної кількості браку кінцевої продукції.

Відомі на сьогоднішній день системи керування процесом випалювання розглядають питання якості продукції та енергозбереження окремо одне від одного, без комплексного підходу до їх розв'язання у рамках однієї оптимальної системи керування.

У праці [1] запропонована система програмного керування процесом випалювання вуглецевих виробів. На жаль, така система, як і будь-яка інша система програмного керування, має ряд недоліків, до яких у даному випадку можна віднести наступні:

– у разі відключення електроживлення, що сьогодні не є чимось незвичним, подальше керування процесом випалювання стає проблемним, орієнтованим знову ж таки на досвід оператора-технолога;

– при такому способі керування не контролюються заготовки, які знаходяться у «гарячій зоні» з найвищими температурами, де перепад температур по висоті заготовки може перевищувати допустимі межі, що призведе до механічних ушкоджень (браку продукції);

– неможливо врахувати збурення, які діють в процесі випалювання: зміну температури повітря, можливу зміну співвідношення паливо/повітря, зміну величини вакууму тощо.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Але, незважаючи на спроби автоматизувати роботу багатокамерних кільцевих печей випалювання [2], до останнього часу так і не була реалізована ефективна система керування даного процесу [3–5].

Проаналізуємо декілька найбільш цікавих розробок останніх років, які, якщо не безпосередньо, то хоча б опосередковано, можуть стосуватися процесу випалювання..

У роботі [6] представлена система керування температурою сталевих смуги. Система побудована за ієрархічним принципом. Верхній рівень називається «оптимальним контролем попереднього перегляду», який виконує попередній контроль. Він переглядає наближення зміни налаштування, якими є зміна розміру смуги або еталонної температури, і оптимізує швидкість лінії і траєкторію температури смуги. Наступний, нижній рівень називається «контроль відстеження температури», який реалізує замкнене керування, використовуючи вищевказану траєкторію в якості контрольної мети.

Що стосується переваг роботи запропонованого підходу в порівнянні з традиційним ПІД-контролем, то найбільшою перевагою є збільшення продуктивності виробництва від 3 до 5 %, оскільки контроль є достатньо точним, щоб позбавити операторів від частого втручання та уповільнення швидкості лінії через небезпеку недогрівання смуги.

Застосування даного підходу при випалюванні вуглецевих заготовок в багатокамерних печах у випадку, коли в камерах, що знаходяться «під вогнем», і камерах на підігріванні димовими газами розміщені різні за розміром заготовки може призвести до визначення елементом верхнього рівня даної ієрархії траєкторії температури для камери, що знаходяться «під вогнем», недопустимої для відтворення траєкторії температури камери, що знаходяться на підігріванні димовими газами. Оскільки температура димових газів прямо залежить від температури факелу,

то в даному випадку можлива ситуація, при якій витрата палива на камері «під вогнем» достатня для забезпечення теплового режиму, а для камер з іншими заготовками, що знаходяться на етапі підігріванні димовими газами, температурний режим перевищує допустимі значення. Відтак може скластися ситуація, в якій деякі заготовки не будуть відповідати поставленим умовам якості.

Традиційна система керування на базі ПІД-регулятора може задовольнити вимоги до системи керування в більшості випадків, але не в процесі керування об'єктом з нелінійними, тимчасовими змінами, характерними для процесу випалювання вуглецевих виробів. Для вирішення даної проблеми в роботі [7] представлена система керування температурою на основі ПІД-каскаду, що заснована на Сміт-оцінці попередньої компенсації. Використання каскадного керування при розробці системи керування багатокамерною піччю випалювання має ряд переваг, проте через інерційність об'єкта навіть очікування зміни температури печі на деяких ключових етапах займає досить значний час. Відтак некоректний керуючий вплив призведе до нераціонального використання тих чи інших ресурсів.

У дослідженнях [3; 8; 9] система керування багатокамерною піччю випалювання на базі штучних нейронних мереж. Дана система, на думку авторів, у порівнянні з системою керування з класичним ПІД-регулятором забезпечує економію витрат палива та підвищення якості готової продукції за рахунок зменшення перепадів та приростів температури протягом всього процесу випалювання.

**Постановка завдання.** Наведені вище обставини обумовлюють необхідність створення системи керування процесом випалювання, яка б задовольняла наступним вимогам:

- дана система має бути системою реального часу;
- система повинна комплексно розв'язувати питання енергозбереження та забезпечення потрібної якості вуглецевих виробів;
- з метою запобігання браку готової продукції система має узгоджувати допустимі перепади температур у заготовках з тривалістю процесу випалювання;
- у разі виникнення аварійних ситуацій після їх усунення процес випалювання має продовжуватись з урахуванням вище названих умов.

Таким чином, метою даної статті є синтез та дослідження системи керування процесом випалювання вуглецевих виробів, яка б відповідала наведеним вище вимогам.

**Виклад основного матеріалу.** Будь-яка система реального часу будується на вимірюванні технологічних параметрів, які є для неї визначальними. До визначальних технологічних параметрів процесу випалювання вуглецевих виробів відносяться параметри, що, з одного боку, обумовлюють тривалість процесу, а, з іншого боку, забезпечують відсутність бракованої продукції. Тому перш за все треба з'ясувати які саме технологічні параметри є визначальними у даному випадку і яким чином організувати їх вимірювання.

Численні дослідження [1–5; 8] свідчать, що всі техніко – економічні показники процесу випалювання вуглецевих виробів пов'язані з температурним режимом його реалізації. У праці [8] показано, що весь простір камери випалювання може бути умовно розбитий на три теплові зони: гарячу, холодну та підсклепінчасту з відповідними найвищими, найнижчими та проміжними температурами. Причому, що дуже важливо, міграція цих зон не спостерігається при зміні типорозмірів заготовок та їх комбінацій.

Очевидно, що процес випалювання має тривати до повного його завершення у заготовці з найнижчою температурою. Тоді доцільно як температуру, яка фактично визначає тривалість процесу випалювання, розглядати температуру нижньої точки найхолоднішої заготовки у холодній зоні камери.

Брак продукції у процесі випалювання, як правило, обумовлений перевищенням допустимого перепаду температур у заготовці, що призводить до виникнення тріщин [1; 4; 5; 8]. Як показали проведені дослідження [4; 5; 8], найбільш «небезпечними» у цьому розумінні є заготовки у гарячій зоні печі. Цей факт обумовлює доцільність вимірювання температур верхньої та нижньої точок заготовки з найвищою температурою у гарячій зоні.

Зрозуміло, що виміряти температуру всередині заготовки неможливо, але, як свідчать результати проведених досліджень [3; 8; 10], температура пересипки біля заготовки практично не відрізняється від температури самої заготовки, а температуру пересипки виміряти можна. Тому для використання у системі керування процесом випалювання пропонуються температури пересипки у відповідних точках. Для реалізації такої системи потрібно розмістити термопару у пересипці поблизу нижньої частини заготовки у зоні з мінімальною температурою, та дві термопари у пересипці біля верхньої та нижньої частини заготовки, яка знаходиться у зоні з максимальною температурою. Останні термопари потрібні

для вимірювання різниці температур у заготовці з максимальним їх перепадом.

Термопара у зоні з мінімальною температурою дає можливість, крім того, враховувати усі можливі названі вище збурення.

Систему керування процесом випалювання вуглецевих виробів з урахуванням вимог до неї, сформульованих вище, доцільно будувати на основі лінійно-квадратичного регулятора.

Як критерій оптимальності будемо використовувати наступний вираз:

$$J = \sum_{k=0}^N [q(T(k) - T_{зад}(k))^2 + ru^2(k) + \frac{f}{(\Delta T(k) - \Delta T_{дон}(k))^2}]. \quad (1)$$

де  $q$ ,  $r$  та  $f$  – параметри налаштування;  $T_{зад}(k)$  – задане значення температури у точці 3;  $\Delta T(k)$ ,  $\Delta T_{дон}(k)$  – перепад температур поточний та допустимий відповідно.

Для розв'язання задачі (1) потрібно використовувати пошукові методи оптимізації [1].

У разі аварійної ситуації (відключення енергоживлення) процес керування відновлюється, починаючи з того стану, в якому він опинився на момент ліквідації аварійної ситуації (відновлення енергоживлення).

**Метою дослідження**, наведеного нижче, системи керування реального часу було з'ясувати наскільки обмеження на максимальний перепад температур у найбільш «небезпечній» заготовці (у заготовці, яка знаходиться у «гарячій зоні» з найвищими температурами) впливає на тривалість процесу випалювання. При цьому налаштування ЛК-регулятора залишалися незмінними.

Результати проведеного дослідження представлені на рис. 1, де  $Tk = N\Delta\tau$  ( $\Delta\tau$  – час дискретизації) – тривалість процесу випалювання.

Точки 1 і 2 – відповідно верхня і нижня точки заготовки, яка розташована у «гарячій зоні» з найвищими температурами. Саме різниця температур у цих точках формує максимальний перепад, який є предметом даного дослідження. Точка 3 – нижня точка заготовки у «холодній зоні», де температура найменша. Температура у цій точці визначає тривалість процесу випалювання. Процес випалювання вважався завершеним, коли температура у точці 3 досягала 1300 °С.

Як видно з результатів дослідження, тривалість процесу випалювання фактично визначається допустимим перепадом температур у заготовці. У разі незначних допустимих перепадів температур навіть значна тривалість процесу не забезпечує потрібну якість продукції (рис. 1а, 1б, 1в). Більше того, перевищення допустимих значень

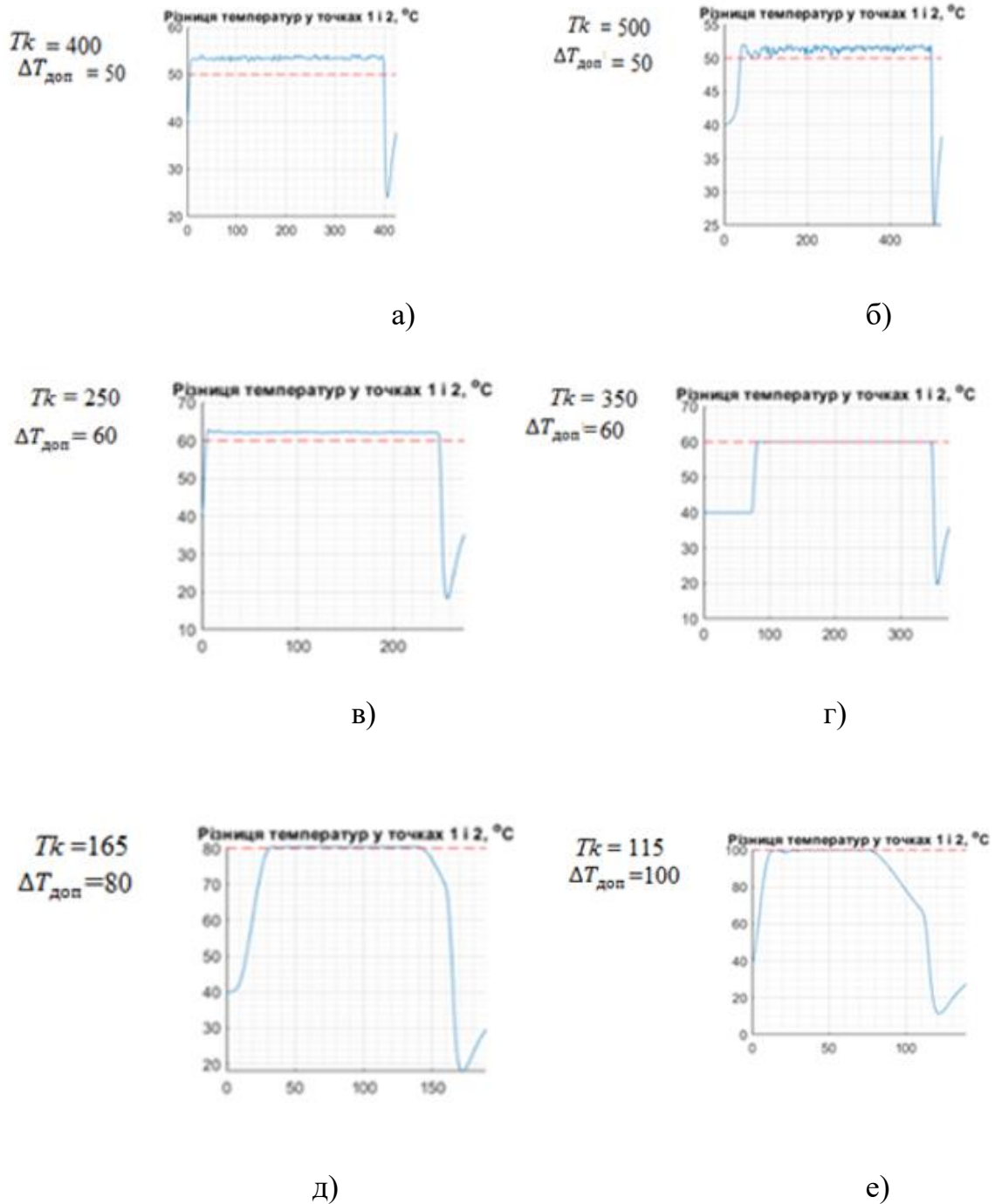


Рис. 1. Результати проведеного дослідження

перепадів спостерігається протягом всієї кампанії випалювання, що гарантовано призведе до браку продукції.

При збільшенні допустимих перепадів температур (рис. 1г, 1д, 1е) суттєво скорочується потрібна тривалість процесу випалювання. При досить значних допустимих перепадах (рис. 1е) максимальне їх значення спостерігається на протязі тільки частини кампанії випалювання.

Зміна параметрів налаштування регулятора може скоригувати картину процесу випалювання, але загальна тенденція залишиться без змін.

**Висновки.** Запропонована система керування процесом випалювання вуглецевих виробів реального часу, яка дозволяє враховувати поточні збурення, діючи в процесі випалювання, а також продовжувати оптимальне керування технологічним процесом після його зупинки, викликаної аварій-

ними ситуаціями (наприклад, відключенням енергоживлення).

Проведене дослідження засвідчило, що заданий допустимий перепад температур у найбільш «небезпечній» заготовці фактично визначає доцільну тривалість процесу випалювання, а, значить, в решті решт, впливає на загальну продуктивність виробництва.

Як показали результати проведеного дослідження, навіть незначне збільшення допустимого

перепаду температур у заготовці призводить до суттєвого збільшення тривалості процесу випалювання.

Представлена система керування процесом випалювання вуглецевих виробів побудована на основі лінійно-квадратичного регулятора. Видається доцільним розглянути питання про можливість застосування модельно-прогнозуючого керування (Model Predictive Control) у процесі випалювання вуглецевих виробів, що і має бути предметом подальших досліджень.

#### Список літератури:

1. Коротинський А. П. Дослідження впливу витрати палива на температурні поля печі випалювання вуглецевих виробів / О. А. Жученко, А. П. Коротинський. *Збірник наукових праць національного університету кораблебудування імені Адмірала Макарова*. 2019. № 4 (478). С. 3–10.
2. Жученко Л. К. Автоматизація процесів керування термічною обробкою вуглецевих матеріалів : дис. докт. філософії : 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Київ, 2024. 164 с.
3. Жученко О. А. Постановка задачі керування процесом випалювання у виробництві вуглецевих виробів / О. А. Жученко, А. П. Коротинський. *Гірничий вісник. Науково-технічний збірник. ДВНЗ «Криворізький національний університет»*. 2017. № 102. С. 174–179.
4. Коротинський А. П. Аналіз процесу випалювання вуглеграфітових виробів / А.П. Коротинський, О.А. Жученко. *Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта)* : Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції. (Київ, 14–18 листопада 2016 р). Київ : НУБіП, 2016 р. С. 64–65.
5. Жученко О. А. Задачі керування процесом випалювання / О. А. Жученко, А. П. Коротинський. *Автоматика – 2017* : матеріали XIV Міжнародної конференції з автоматичного управління. (Київ, 13–15 вересня 2017 р.). Київ. 2017. С. 68–69.
6. Yoshitani N., Hasegawa A. Model-Based Control of Strip Temperature for the Heating Furnace in Continuous Annealing. *IEEE Transactions On Control Systems Technology*. 1998. Vol. 6. № 2.
7. Ke X., Luo Z., Zhu Y., Liu Y. The Temperature Control System of Continuous Diffusion Furnace. *In Proceedings of the 13th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2016)*. Vol. 1. P. 227–233. DOI: 10.5220/0005996402270233
8. Коротинський А.П. Автоматизація процесу керування багатокамерними печами випалювання вуглеграфітових виробів : дис. докт. філософії : 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Київ, 2020. 190 с.
9. A system of automated control for the baking process that minimizes the probability of defects / А. Korotynskiy, О. Zhuchenko. *Східно-Європейський журнал передових технологій* : Міжнародний наукометричний журнал. 2020. № 1/2 (103). С. 58–67.
10. Жученко Л.К. Система програмного керування процесом випалювання вуглецевих виробів / Л. К. Жученко. *Прикладні питання математичного моделювання*. 2023. Т. 6. № 1. С. 46–53. DOI: <https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2023-6-1-5>

#### **Zhuchenko L.K. CONTROL SYSTEM OF THE CARBON PRODUCTS BURNING PROCESS**

*Carbon graphite materials play an important role in various branches of Ukrainian industry: chemical and electrical engineering, ferrous and non-ferrous metallurgy, mechanical engineering, and others. The quality of carbon graphite products directly depends on the process of their production. One of the defining stages of production is the process of burning carbon graphite products, which is characterized by significant energy and resource consumption. An effective method of solving the problem of energy saving and ensuring the required quality of final products in the burning process is the creation of a modern system for control this process.*

*The article shows that in order to ensure the required quality of carbon products in the burning process, it is necessary to solve two tasks: to prevent exceeding the permissible temperature difference in the workpiece and to ensure the required duration of the burning process. The presented results of the study of the relationship between these indicators show that the value of the maximum permissible temperature difference significantly affects the duration of the burning process, and therefore, its overall productivity.*

*The article proposes a real-time control system for the burning process of carbon products, which solves the set problems, and also allows taking into account current disturbances acting in the burning process and*

*provides optimal control of the technological process after its stoppage caused by emergency situations (for example, power failure).*

*The determining technological regime of the burning process is the temperature regime of its operation. A linear-quadratic controller is used to optimally control the temperature regime of this process. The control system optimality criterion includes three components that ensure: compliance with the specified temperature regime at the lowest point of the workpiece with the lowest temperature, which is in the cold zone of the burning furnace, prevention of exceeding the maximum permissible temperature difference in the workpiece with the highest temperature in the hot zone of the furnace, and cost savings fuel.*

**Key words:** *burning, temperature regime, temperature difference, process duration, control system, linear-quadratic regulator.*

УДК 004.52

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.1/13>**Завгородній В.В.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Завгородня Г.А.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Завгородній В.В.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Глуценко А.І.**

Державний університет інфраструктури та технологій

## МЕТОД АНАЛІЗУ ПОДІБНОСТІ АУДІОЗАПИСІВ НА ОСНОВІ ХЕШ-ТОКЕНІВ

У роботі розглянуто метод аналізу подібності аудіозаписів на основі хеш-токенів. У світі музики, існує проблема для виконавців, пов'язана з пошуком схожих аудіозаписів за настроєм або стилем, яка виникає через обмежену функціональність традиційних музичних сервісів з алгоритмами рекомендацій. Основна проблема полягає в тому, що існуючі музичні платформи не завжди здатні точно враховувати особисті вподобання та потреби виконавців у пошуку нових музичних ідей. Тому, розробка зручного інструменту для виконавців, який дозволить їм шукати аудіозаписи, схожі за настроєм або стилем, стає актуальною задачею у музичній індустрії.

Основною концепцією у даній статті є поняття «відбитку» аудіозапису. «Відбиток» аудіозапису представляє собою набір хеш-токенів, які ідентифікують конкретний запис за ключем і певну частотну адресацію у спектрограмі. Ці хеш-токени використовуються як ключі для збереження основної інформації про аудіозапис у спеціальних сховищах. Це спрощує швидкий доступ до аудіозаписів та забезпечує зручний формат для зберігання цих даних.

Основні кроки для розробки системи аналізу подібності аудіозаписів включають оцифрування аудіозапису, дискретизацію, перетворення стерео в моно, даунсемплінг, виконання швидкого перетворення Фур'є, створення спектрограми, визначення найвищих частот за одиницю часу, збереження хеш-токенів у базі даних та порівняння цих відбитків між собою.

Для уточнення подібності та видалення аномалій рекомендується використовувати статистичний метод виявлення викидів. Такий крок допомагає точніше визначити список схожих аудіозаписів та зменшити обчислювальне навантаження на подальших етапах аналізу.

Після цього треба упорядкувати список аудіозаписів, що порівнюються з поточним, від найбільш до найменш схожих. Метод аналізу подібності дозволяє швидко і ефективно визначати ступінь схожості між аудіозаписами без необхідності порівняння кожної частини запису.

**Ключові слова:** відбиток аудіозапису, система рекомендацій, хеш-токен, спектрограма, цільова точка.

**Постановка проблеми.** На сьогоднішній день, у світі музики, існує проблема для виконавців, пов'язана з пошуком схожих аудіозаписів за настроєм або стилем, яка виникає через обмежену функціональність традиційних музичних сервісів з алгоритмами рекомендацій.

Традиційні музичні платформи, хоч і мають розвинені системи рекомендацій, зазвичай обмежені в тому, що пропонують користувачеві в основному вже популярні та відомі композиції. Це означає, що виконавці, які шукають інші аудіо-

записи для натхнення або для порівняння своєї творчості з іншими, можуть зіткнутися з обмеженнями у доступі до різноманітних музичних творів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Літературні дослідження з аналізу звукових сигналів і спектрограм були проведені задовго до появи систем аналізу музичних записів. Робота [1–3] є основоположною у світі систем виявлення інформації у музиці (MIR). У ній досліджуються різні аспекти аналізу звукових сигналів та

спектрограм для створення ефективних систем аналізу музичних записів. Проте питання розвитку технологій MIR та використання новітніх методів аналізу у цій роботі розглянуто лише поверхово.

Автори робіт [4; 5] зосередилися на аналізі структури музики з використанням аудіозаписів. Вони описують методи і алгоритми, які використовуються для розпізнавання та аналізу музичних елементів.

У роботі [6–8] автор висвітлює ефективність підходу до класифікації музичних жанрів на основі спектрограм та згорткових нейронних мереж для аналізу музичних записів за їхнім жанром [9]. Автоматичне отримання характеристик музичних патернів з використанням згорткових нейронних мереж досліджують роботи [10–12], проте недостатньо розкритий вплив параметрів нейронних мереж на результати аналізу [13–15].

Дослідження новітніх технологій та алгоритмів для вдосконалення систем виявлення інформації у музиці, зокрема, розробка нових алгоритмів для класифікації музичних жанрів та структур.

**Постановка завдання.** Потреба у зручному інструменті для виконавців полягає в тому, щоб мати можливість швидко та ефективно знаходити аудіозаписи, які мають схожий стиль з їхніми власними творами.

Основна проблема полягає в тому, що існуючі музичні платформи не завжди здатні точно враховувати особисті вподобання та потреби виконавців у пошуку нових музичних ідей. Тому, розробка зручного інструменту для виконавців, який дозволить їм шукати аудіозаписи, схожі за настроєм або стилем, стає актуальною задачею у музичній індустрії.

**Виклад основного матеріалу.** Основною концепцією у даній статті є поняття «відбитку» аудіозапису. «Відбиток» аудіозапису представляє собою набір хеш-токенів, які ідентифікують конкретний запис за ключем і певну частотну адресацію у спектрограмі. Ці хеш-токени, зазвичай у форматі md5, використовуються як ключі для збереження основної інформації про аудіозапис у спеціальних сховищах, наприклад, hash-value. Це спрощує швидкий доступ до аудіозаписів та забезпечує зручний формат для зберігання цих даних. Основні кроки для розробки такої системи включають оцифрування аудіозапису, дискретизацію, перетворення стерео в моно, даунсемплінг (зменшення частоти дискретизації), виконання швидкого перетворення Фур'є (FFT), створення спектрограми, визначення найвищих частот за одиницю часу, збереження хеш-токенів (відбит-

ків) у базі даних та порівняння цих відбитків між собою.

Кожен аудіофайл може бути підданий процесу створення відбитка, який включає вилучення хеш-токенів для його представлення. Невідомі відбитки порівнюються з широким набором відбитків із бази даних. Як сама база даних, так і досліджуваний аудіофайл проходять той же процес створення відбитка.

Відповідність кандидатур оцінюється щодо правильності співпадіння. Один з критеріїв правильності – це синхронізація за часом. Група хеш-токенів може бути близькою або віддаленою від аналогічної групи хеш-токенів іншого аудіозапису, що може свідчити про те, що досліджуваний аудіозапис є частиною будь-якого часового діапазону іншого аудіозапису.

Для надійної ідентифікації пісень у присутності шумів та спотворень важливо враховувати лише найсильніші за амплітудою частоти в кожній часовій області. Такі «піки» у спектрограмі з великою ймовірністю витримають спотворення. Набори таких піків на спектрограмі двох подібних аудіозаписів будуть аналогічними або схожими. Спектрограма відображає потужність сигналу відносно часу на різних частотах, може бути представлена як двовимірний графік з третьою змінною – кольором, або тривимірний графік з четвертою змінною – кольором.

Перед зберіганням пікових значень у сховищі необхідно розуміти, як будуть порівнюватися різні аудіозаписи. Наприклад, якщо вирішено порівнювати кожен пікову частоту одного запису з кожною піковою частотою іншого запису, при наявності сотень аудіозаписів у сховищі це може призвести до значної кількості порівнянь.

Замість цього, для порівняння краще шукати кілька точок одночасно – ця група точок називається цільовою зоною. Щоб впевнитися, що як уривок, так і повна пісня, генерують ті самі цільові зони, необхідно встановити відносини між частотно-часовими точками у фільтрованій спектрограмі:

1. Якщо дві точки мають однаковий час, то першою вважається точка з найнижчою частотою.

2. Першими йдуть точки з найменшим часом.

Потрібно створити відносні адреси цільової зони, вибравши опорну точку за межами зони. Наприклад, розмір цільової зони дорівнює 5, а опорна точка – це третя точка перед кожною зоною (рис. 1). Далі необхідно сформувати адресу наступного формату: [«Частота опорної точки», «Частота цільової точки», «Різниця у часі між опорною точкою та цільовою точкою»].



Тобто, адреса точки номер «4» у межах зони буде [10, 10, 2], а для точки номер «6» у тій же зоні – [10, 30, 2]. Для оптимального зберігання у вигляді ключа в сховищі хешів можна захешувати ці адреси в md5. Ключем може бути кортеж з абсолютного часу опорної точки в пісні та ідентифікатора пісні в базі даних, щоб забезпечити узгодженість часу.

На рисунку 2 показано можливий випадок, коли існують дві цільові зони, що належать двом різним пісням (верхній графік відноситься до першої досліджуваної пісні, нижній – до дру-

гої). Тобто цільові зони просто поміняли місцями у цих аудіозаписах. Якщо не враховувати часову узгодженість, ці цільові зони можуть збільшувати відсоток збігу між двома піснями, тоді як вони можуть звучати по-різному, оскільки ноти в цих цільових зонах не відтворюються в однаковому порядку. Слід оцінювати схожість двох аудіозаписів не лише на основі наявності однакових ключів у сховищі та їх кількості, але й з урахуванням часової узгодженості. Тому в сховище у значенні поля ключа зберігається абсолютний час.

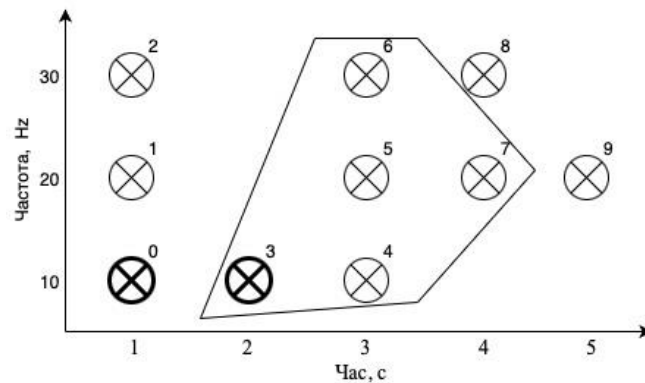


Рис. 1. Зображення цільової зони, а також цільової та опорної точок

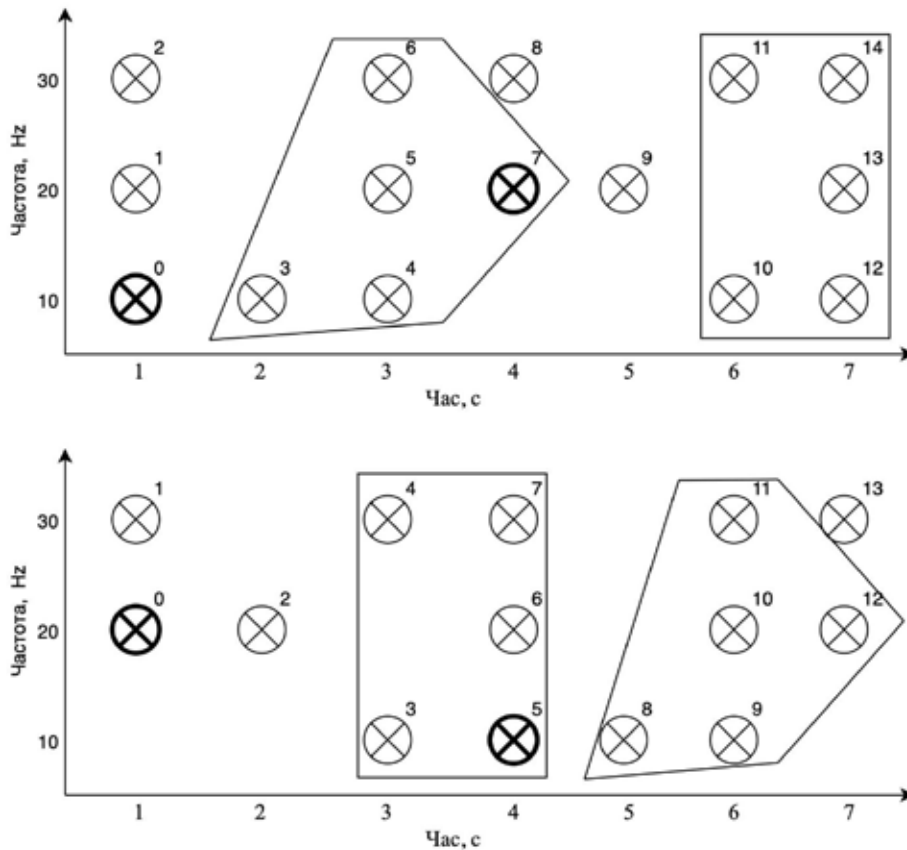


Рис. 2. Подібні цільові зони у різних аудіозаписах

За допомогою абсолютного часу можна визначити різницю (дельту) між поточним аудіозаписом і порівнюваним. Якщо безліч дельт прямує до схожого значення, можна зробити висновок про схожість даних записів. Алгоритм аналізу узгодженості за часом можна провести за такими кроками:

- 1) створення відбитка поточного аудіозапису;
- 2) знаходження запису у сховищі за ключем з використанням отриманих ключів із відбитка;
- 3) у значенні ключа має бути поле з ідентифікатором поточного аудіозапису  $i$ , можливо, поля з ідентифікаторами інших аудіозаписів;
- 4) якщо існують поля з ідентифікаторами інших аудіозаписів, то обчислюється дельта між абсолютним часом досліджуваного запису та поточним.

Після збереження даних у хеш-таблиці за алгоритмом аналізу узгодженості за часом, проводиться подальша обробка для визначення схожості аудіозаписів. Така обробка складається з наступних кроків:

1. Оцінка різниці (дельти) між абсолютними часами аудіозаписів проводиться для кожної пари записів у хеш-таблиці. Це допомагає визначити, наскільки схожі або відмінні записи за своїм часовим параметром.

2. За допомогою результатів аналізу дельт за часом групуються аудіозаписи, які мають схожі часові характеристики. Це допомагає створити кластери подібних записів для подальшого аналізу.

3. На основі групування або класифікації аудіозаписів обчислюється ступінь їхньої схожості. Це включає визначення метрик схожості, таких як відстань Манхеттена, косинусна схожість або інші метрики, що враховують особливості аудіозаписів.

4. На основі отриманих даних про схожість проводять класифікацію аудіозаписів за певними критеріями, такими як жанр, настрій, стиль тощо. Це дозволяє створити більш точні та розширені системи рекомендацій або пошуку подібних музичних творів.

5. Отримані дані можуть бути інтегровані з іншими алгоритмами аналізу сигналів або машинного навчання для ще більш точного визначення схожості аудіозаписів та покращення систем обробки музичної інформації.

Система має визначати подібність між аудіозаписами, а не обов'язково шукати лише один найбільш ідентичний запис. Це означає, що сис-

тема повинна виявляти як схожість реміксів треку, що цікавить, так і записів з певними шумами чи тишею.

Ремікси можуть мати лише деякі схожі секунди з оригіналом, тому слід враховувати такі варіації як подібні. Також, аудіозаписи можуть містити періоди тиші, що може впливати на правильність порівняння.

Для уточнення подібності та видалення аномалій рекомендується використовувати статистичний метод виявлення викидів, наприклад, правило трьох сигм. Цей підхід дозволяє відфільтрувати значення дельт часу, які відхиляються від середнього значення на певну кількість сигм. Такий крок допомагає точніше визначити список схожих аудіозаписів та зменшити обчислювальне навантаження на подальших етапах аналізу.

Після цього треба упорядкувати список аудіозаписів, що порівнюються з поточним, від найбільш до найменш схожих. Для цього можуть бути використані два методи: середньоквадратичного відхилення та ранжування за кількістю дельт.

Найбільш схожі записи мають найменшу різницю у значеннях дельт часу, що означає, що значення дисперсії набору дельт є пропорційним ступеню схожості аудіозаписів.

Другий метод полягає у визначенні кількості дельт, які найбільш близькі до певної кількості  $N$  дельт. Ці  $N$  дельт вибираються як перші  $N$  дельт у відсортованому за зменшенням кількості збігів списку дельт. Цей підхід ефективний для невеликих уривків, які мають низьке значення дисперсії порівняно з іншими записами через низьку ентропію дельт, пов'язану з короткою тривалістю запису.

**Висновки.** Метод аналізу подібності аудіозаписів на основі хеш-токенів базується на використанні унікальних хеш-токенів, які представляють собою відбиток аудіозапису. Основні методи включають: створення відбитка, збереження хеш-токенів, пошук подібних аудіозаписів, визначення ступеня схожості. Цей метод дозволяє швидко і ефективно визначати ступінь схожості між аудіозаписами без необхідності порівняння кожної частини запису.

У майбутній роботі над цим проєктом планується впровадження автоматичного визначення музичного жанру за допомогою MFCC (Mel-frequency cepstral coefficients) і покращення якості визначення подібних аудіозаписів шляхом використання інформації про жанр.

Список літератури:

1. Coviello E., Chan A.B., Lanckriet G. Time Series Models for Semantic Music Annotation. *IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing*. 2011. Vol. 19. № 5. P. 1343–1359. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASL.2010.2090148>
2. Завгородній В.В., Завгородня Г.А., Байраковський В.В., Коваль Р.А. Розробка методу виявлення схожих пісень на основі аналізу їх звукових характеристик. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Том 34 (73). № 3. С. 151–156. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.1/24>
3. Paulus J., Müller M., Klapuri A. State of the Art Report: Audio-Based Music Structure Analysis. *Proceedings of the 11th International Society for Music Information Retrieval Conference*. 2010. P. 625–636. URL: [http://paulus.kapsi.fi/pubs/paulus\\_ismir10\\_star\\_presentation.pdf](http://paulus.kapsi.fi/pubs/paulus_ismir10_star_presentation.pdf)
4. Muller M., Ellis D., Klapuri A., Richard G. Signal processing for music analysis. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. 2011. Vol. 5. № 6. P. 1088–1110.
5. Shaikh T., Jadhav A. Music Genre Classification Using Neural Network. *ITM Web of Conferences*. 2022. Vol. 44. P. 03016. DOI: <https://doi.org/10.1051/itmconf/20224403016>
6. Zavgorodnya A., Zavgorodnii V., Plisenko V, Provatorov N., Kudientsov P. Methods modeling systems for the improvement of their reliability. *International Academy Journal Web of Scholar*. 2019. Vol. 9. Is. 39. P. 3–11. DOI: [https://doi.org/10.31435/rsglobal\\_wos/30092019/6683](https://doi.org/10.31435/rsglobal_wos/30092019/6683)
7. Mukhin V., Komaga Y., Zavgorodnii V., Zavgorodnya A., Herasymenko O., Mukhin O. Social Risk Assessment Mechanism Based on the Neural Networks. *IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*. 2020. P. 179–182. DOI: <https://doi.org/10.1109/ATIT49449.2019.9030519>
8. Lee C.H., Kim D. Automatic Musical Pattern Feature Extraction Using Convolutional Neural Network. *The International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*. 2010. Vol. 10.
9. Mukhin V., Zavgorodnii V., Kornaga Ya., Zavgorodnya A., Krylov Ie., Rybalochka A., Kornaga V., Belous R. Devising a Method To Identify an Incoming Object Based on the Combination of Unified Information Spaces. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 3 (2). No 111. P. 35–44. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.229568>
10. Yu D., Duan H., Fang J., Zeng B. Predominant Instrument Recognition Based on Deep Neural Network With Auxiliary Classification. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*. 2020. Vol. 28. P. 852–861. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASLP.2020.2971419>
11. Pelchat N., Gelowitz C.M. Neural Network Music Genre Classification. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2020. Vol. 43. No. 3. P. 170–173. DOI: <https://doi.org/10.1109/CJECE.2020.2970144>
12. Zavgorodnii V., Zavgorodnya A., Maiko V., Malikov V., Zhuk D. Methods and models for assessment of reliability of structural-complex systems. *World science*. 2018. Vol. 11. Is. 39. P. 5–14.
13. Goto M., Dannenberg R.B. Music Interfaces Based on Automatic Music Signal Analysis: New Ways to Create and Listen to Music. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2019. Vol. 36. № 1. P. 74–81. DOI: <https://doi.org/10.1109/MSP.2018.2874360>
14. Kim T., Lee J., Nam J. Comparison and analysis of sampleCNN architectures for audio classification. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. 2019. Vol. 13. № 2. P. 285–297. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSTSP.2019.2909479>
15. Wind W.Y.Ng, Zeng W., Wang T. Multi-Level Local Feature Coding Fusion for Music Genre Recognition. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 152713–152727. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3017661>

**Zavgorodnii V.V., Zavgorodnya A.A., Zavgorodnii V.V., Hlushchenko A.I. METHOD OF ANALYSIS OF AUDIO RECORDINGS BASED ON HASH TOKENS**

*The paper considers the method of analyzing the similarity of audio recordings based on hash tokens. In the world of music, there is a problem for artists related to finding similar audio recordings by mood or style, which arises due to the limited functionality of traditional music services with recommendation algorithms. The main problem is that the existing music platforms are not always able to accurately take into account the personal preferences and needs of artists in the search for new musical ideas. Therefore, the development of a convenient tool for performers, which will allow them to search for audio recordings similar in mood or style, is becoming an urgent task in the music industry.*

*The main concept in this article is the concept of “imprint” of an audio recording. The “fingerprint” of an audio recording is a set of hash tokens that identify a specific recording by key and a certain frequency addressing in the spectrogram. These hash tokens are used as keys to store basic information about the audio recording in special repositories. This facilitates quick access to audio recordings and provides a convenient format for storing this data.*

*The basic steps for developing an audio similarity analysis system include digitizing the audio, sampling, converting stereo to mono, downsampling, performing a fast Fourier transform, creating a spectrogram, determining the highest frequencies per unit time, storing hash tokens in a database, and comparing these fingerprints between by myself*

*To clarify similarities and remove anomalies, it is recommended to use the statistical method of detecting outliers. Such a step helps to more accurately determine the list of similar audio recordings and reduce the computational load in the subsequent stages of the analysis.*

*After that, you need to sort the list of audio recordings that are compared with the current one, from the most to the least similar. The similarity analysis method allows you to quickly and efficiently determine the degree of similarity between audio recordings without the need to compare each part of the recording.*

**Key words:** *audio fingerprint, recommendation system, hash token, spectrogram, target point.*

**Ісаєв Т.С.**

Хмельницький національний університет

**Кисіль Т.М.**

Хмельницький національний університет

## МЕТОД РОЗПІЗНАВАННЯ ЕМОЦІЙ ЛЮДИНИ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ ЗА ДОПОМОГОЮ МАШИННОГО ЗОРУ

У наш час існують різні методи і різні ознаки, які можуть бути використані для розпізнавання обличчя і емоцій, таких як обличчя, текст, мова і так далі. Вираз обличчя серед них є найкращою. Виявлення емоцій також широко використовується у багатьох сферах, таких як розуміння поведінки людини, виявлення психічних розладів, виявлення емоцій людей у натовпі тощо. У запропонованій концепції розпізнавання емоцій обличчя можна розділити на три етапи. На першому етапі відбувається виявлення людського обличчя на зображенні з камери, потім на другому етапі вхідні дані аналізуються на основі ознак за допомогою моделі згорткових нейронних мереж (CNN). На останньому етапі відбувається класифікація людських емоцій на 7 основних категорій: страх, гнів, відраза, сум, здивування, нейтральний та радість. Таким чином, запропонована модель розділена на три основні цілі: виявлення обличчя, розпізнавання обличчя та класифікація емоцій. Розпізнавання обличчя має багато важливих застосувань у різних сферах, таких як верифікація особи, безпека, біометрія, смарт-картки, системи спостереження тощо. Міміка передає невербальні сигнали, які відіграють важливу роль у міжособистісних відносинах. Система Cognitive Emotion AI – це процес ідентифікації емоційного стану людини. Основною метою нашого дослідження є розробка надійної системи, яка може виявляти та розпізнавати людські емоції з прямих трансляцій. Методологія цієї системи базується на двох етапах – розпізнавання обличчя здійснюється шляхом вилучення каскаду Хаара та розпізнавання рис обличчя за допомогою алгоритму Віолі-Джонса, а потім відбувається перевірка та розпізнавання емоції за допомогою методів штучного інтелекту. Система приймає зображення або кадр в якості вхідних даних, і шляхом аналізу зображення моделі, виконується попередня обробка та виділення рис обличчя, після чого система прогнозує емоційний стан. У даній роботі було зроблено згорткову нейронну мережу для класифікації людських емоцій за динамічною мімікою обличчя в реальному часі. Також, було проведено навчання нашої системи з використанням моделі Tensorflow, яка була навчена класифікувати людські емоції. Було використано відкриту базу даних із зображеннями для навчання моделі, а також власні фото для покращення результату. Для відображення результатів було підключено живий відеопотік. Отримані результати демонструють можливість застосування нейронних мереж в реальному часі для виявлення людських емоцій.

**Ключові слова:** розпізнавання емоцій, аналітика, тренування моделі, реальний час, машинне навчання, штучний інтелект.

**Постановка проблеми.** Емоції часто опосередковують і полегшують взаємодію між людьми. Таким чином, розуміння емоцій часто вносить контекст у, здавалося б, химерну та/або складну соціальну комунікацію. Емоції можна розпізнати за допомогою цілої низки засобів, як-от: голос, інтонація, мова тіла та більш складними методами, такими як електроенцефалографія (ЕЕГ) [11]. Однак, більш простим і практичним методом є дослідження міміки. Існує сім типів людських емоцій, які, як було доведено, є універсальними для всіх людей [2]: гнів, відраза, страх, щастя, смуток, здивування та нейтральний вираз. Таким чином, утиліта, яка розпізнає емоції за виразом

обличчя, могла б знайти широке застосування. Завдання розпізнавання емоцій є особливо складним з двох причин: 1) не існує великої бази даних навчальних зображень і 2) класифікація емоцій може бути складною в залежності від того, чи є вхідне зображення статичним, чи зображення рухається. Більшість програм розпізнавання емоцій досліджують статичні зображення виразу обличчя. Дослідження застосування згорткових нейронних мереж (ЗНМ) для розпізнавання емоцій у реальному часі за допомогою вхідного відеопотоку є дуже важливими на сьогодні. Враховуючи обчислювальні вимоги та складність штучної моделі, оптимізація мережі для ефективних

обчислень для покадрової покадрової класифікації є необхідною. Крім того, необхідно враховувати варіації освітлення та положення об'єктів. Було розроблено систему для виявлення людських емоцій у різних сценах, ракурсах та умовах освітлення в режимі реального часу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** За останні два десятиліття дослідники значно просунулися в розпізнаванні людських емоцій на обличчі за допомогою комп'ютерного зору. Історично склалося так, що існувало багато підходів до вирішення цієї проблеми, включаючи використання пірамідальних гістограм градієнтів (PHOG) [12], AU, що враховує риси обличчя, покращені LBP-дескриптори та RNN [13]. Однак нещодавні найкращі роботи, подані на конкурс «Емоції в дикій природі» 2020 року [18] використовували глибокі згорткові нейронні мережі (CNN), що дають до 62 % точності тесту.

Нещодавня розробка G. Levi et. al [14] показала значне покращення розпізнавання емоцій на обличчі за допомогою штучного інтелекту. Головною проблемою для дослідників є: 1) мала кількість даних, доступних для навчання глибоких нейронних мереж, та 2) варіації зовнішнього вигляду, які зазвичай спричинені варіаціями освітлення. Вони використовували локальні

бінарні патерни (LBP) для перетворення зображення в інваріантний до освітлення тривимірний простір, який може слугувати вхідними даними для CNN.

Ця спеціальна обробка даних була застосована до різних загальнодоступних модулів, таких як VGG S [15]. Фінальні результати показали точність тесту до 54,56 %. Існує багато підходів до навчання моделі, але вони не мають аналізу точності розпізнавання емоцій, що є великим недоліком тому, що аналіз точності моделі у реальному часі допоможе покращити саму модель та краще зрозуміти які фактори впливають на її роботу та що потрібно для отримання оптимального результату щоб використовувати модель більш досконало.

**Постановка завдання.** Метою роботи є створення моделі, що дозволить аналізувати емоційний стан людини у реальному часі.

**Виклад основного матеріалу.** Створення та дослідження моделі із застосуванням машинного та штучного інтелекту відрізняється від розробки додатків, програм та ігор у тому, що процес моделювання включає постійні дослідження та оновлення даних, здійснюючи експерименти, щоб навчити нейронну мережу розрізняти об'єкти та емоції людини. У машинного навчання власний життєвий цикл, що означає проходження даних через певні етапи розробки та впровадження системи прогнозування. В порівнянні з циклом розробки програмного забезпечення, створення моделей машинного навчання включає етап експериментування з наборами даних для досягнення поставлених цілей і завдань, при цьому використовуються нові дані після проходження етапу навчання.

**Початок роботи із моделлю та її тренування**

На рис. 1 показано структуру запропонованої в цьому дослідженні системи. Як показано на рис. 1, було використано два підходи для виявлення емоцій суб'єкта: виявлення емоцій за допомогою мімічних орієнтирів та виявлення емоцій за допомогою сигналів ЕЕГ [11].

Для тренування моделі необхідно було обрати відкриту базу даних, яка містить картинки людей з різними емоціями та надасть змогу натренувати систему досить гарно. Було обрано базу даних Fer2013 [16]. Ця база даних знаходиться у відкритому доступі, а отже кожен бажаючий без проблем зможе використати картинку без ризику. Вона містить досить багато картинок людей різного віку, які показують різні емоції. Саму систему баз даних із картинками зображено на рис. 2.

У цьому дослідженні було використано HD-камеру для зйомки обличчя суб'єктів та створення

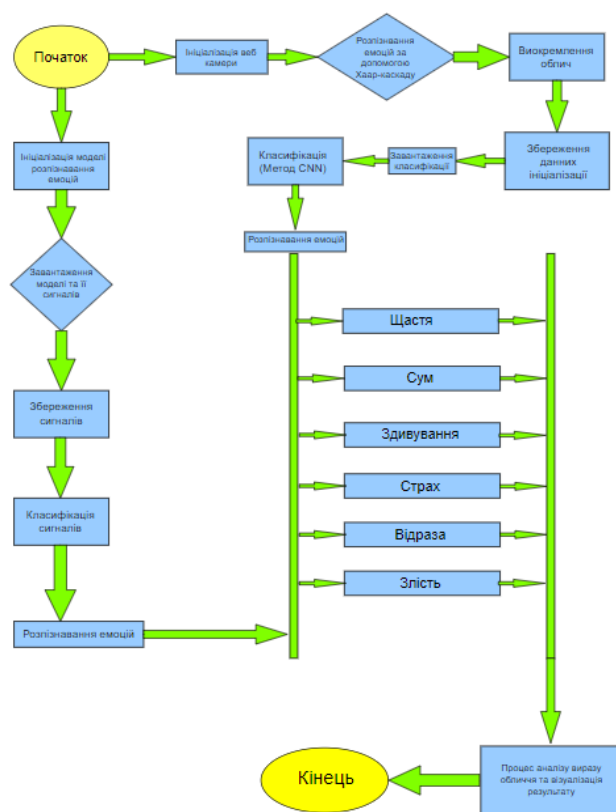


Рис. 1. Процес ініціалізації програми

зображення у відтінках сірого (додатково до наявних зображень у системі Fer2013). Це спростило процес розпізнавання виразу обличчя при розпізнаванні міміки. Потім, використовуючи зображення у відтінках сірого, визначаються очі суб'єкта, і десять віртуальних маркерів (одиниць дії) розміщуються на обличчі суб'єкта у визначених місцях за допомогою математичної моделі.

Алгоритм читання емоцій із зображення ґрунтується на алгоритмі їхнього розпізнавання, який використовується, наприклад, у FaceID. Для вирішення цих завдань із зображень витягуються спеціальні дескриптори обличчя, або вектори ознак. Спочатку мережа глибокого навчання тренується розпізнавати риси обличчя, роблячи це за допомогою карти точок навколо основних його частин (очі, брови, ніс, губи). Відстань між цими точками і є вектор ознак. Подібно до відбитка пальця, вектор ознак буде індивідуальний для кожної людини. Хоча риси обличчя й індивідуальні, вираз одних і тих самих емоцій однаковий у більшості людей. Для їхнього розпізнавання використовують групи точок із вектора ознак. Так, наприклад, підйом групи точок біля куточків рота свідчить про посмішку, зведення групи точок на бровах – про насупленість тощо. Процес розпізнавання зображень на рис. 3.

Алгоритм оптичного потоку Лукаса-Канде використовується для передачі положення кожного віртуального маркера, щоб відстежити його положення під час емоційного вираження суб'єкта. Десять ознак виводяться як відстань між кожним маркером і точкою. У поточному дослідженні всі дані про відстані обчислюються за допомогою теореми Піфагора. Потім вони зберігаються у форматі CSV під час процесу збору даних для подальшої обробки.

Основна функція цього методу – це дослідження відстаней між очима та носом, носом та ротом тощо. Це дає змогу зрозуміти почуття людини внаслідок дослідження її міміки та особливостей виразу обличчя. Звісно, у кожної людини свій власний вираз обличчя, але за допомогою цього методу можна дослідити різні емоції та навчити модель розпізнавати усі ознаки міміки та виразів обличчя людини. Цей процес є досить складним, але внаслідок розвитку технологій, цю систему можна досить



Рис. 2. Фрагмент системи баз даних FER2013[16]



Рис. 3. Процес розпізнавання емоцій [2]

легко імплементувати за допомогою штучного інтелекту та машинного навчання. Увесь процес розпізнавання обличчя людини зображений на рис. 4, де вказано більшість особливостей обличчя людини та процес його ідентифікації.

Згорткова нейронна мережа (CNN) була використана в нашій системі для покращення розпізнавання емоцій обличчя, оскільки вона застосовується в інших комп'ютерних галузях, таких як розпізнавання обличчя та виявлення об'єктів. Крім того, передбачення ґрунтуються на інформації, наданій у певний момент часу.

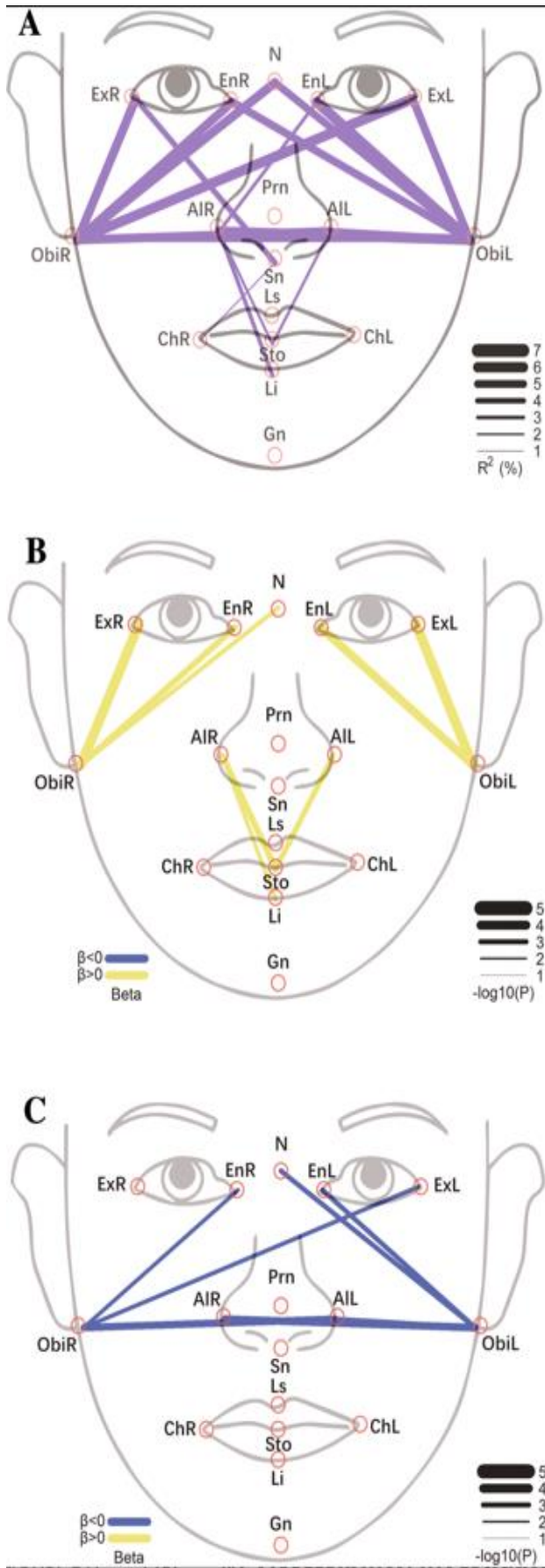


Рис. 4. Процес розпізнання обличчя людини [2]

На рис. 5 показано структуру мережі, яка використовується для розпізнання емоцій за допомогою орієнтирів на обличчі. Ця мережа отримує вхідне зображення і намагається передбачити вихідну емоцію. Вона має вісім етапів, включаючи згортки, об'єднання і повністю з'єднані шари з операціями випрямлених лінійних одиниць (ReLU), які зберігають хорошу якість, але роблять збіжність набагато швидшою. Кількість фільтрів становила 32, 64 і 128 з розміром фільтра  $5 \times 5$  для згорткових шарів, а кількість вихідних вузлів у повністю з'єднаному шарі становила 6 з оптимізатором "Adam" [19] і коефіцієнтом відсіву 0,3.

Щоб виконати поставлене завдання, необхідно створити власну програму, яка дозволить натренувати систему та перевірити отримані знання у реальному часі способом підключення машинного зору.

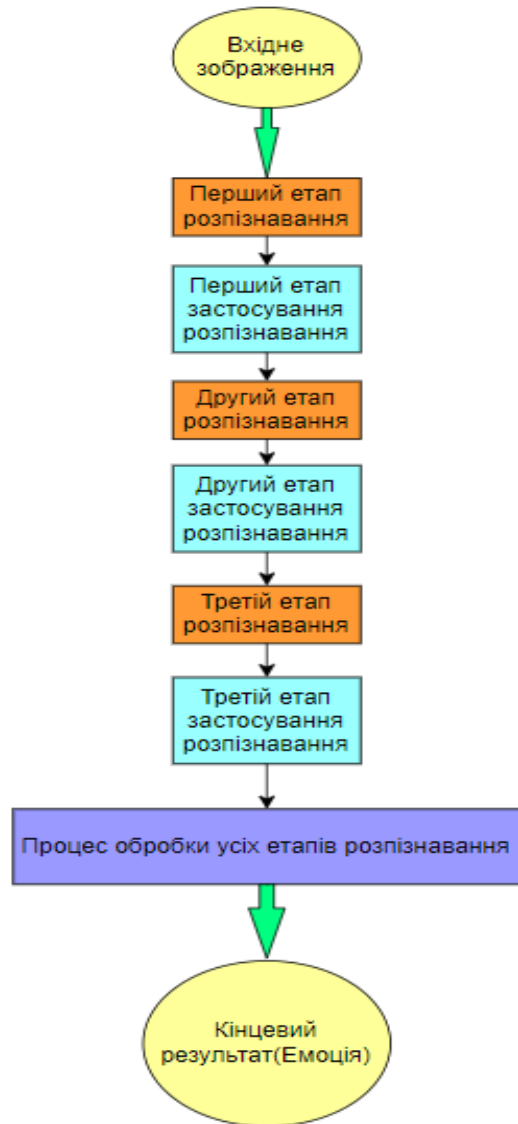


Рис. 5. Процес розпізнання системою CNN



Для тренування було використано середовище Jupyter Notebook [17] та мову програмування Python.

Для ефективної роботи з кодом потрібно завантажити додатки до Python – пакети, які спеціально розроблені для специфічних задач та значно спрощують роботу з кодом та його швидкість. Було використано такі пакети: Tensorflow, Keras, Opencv, pandas, numpy, os. Завантаження додатків можна побачити на рис. 6.

Після підключення усіх додатків, необхідно завантажити зображення всередину моделі для подальшого навчання. Процес завантаження зображень на рис. 7, де картинки вже розділені на навчальні та тренувальні (навчальні для процесу навчання моделі, а тренувальні – самоперевірки моделі та оцінки якості тренування).

Після завантаження зображень потрібно налаштувати модель та характеристики тренування для більш точного підходу системи до навчання. Налаштування моделі для нашої системи зображено на рис. 8. Було специфіковано налаштування нашої моделі та задаємо параметри, необхідні для навчання.

Після налаштування характеристик для тренування, відбувається саме тренування моделі. Цей процес є довготривалим та може зайняти дуже багато часу. Час тренування залежить від характе-

ристик пристрою, на якому відбувається процес. По закінченню ми отримуємо графіки щодо точності та коректності моделі (рис. 9).

На графіку, який зображений на рис. 9, відображена точність під час навчання та самоперевірки моделі внаслідок багатьох етапів перевірки та навчання. Для покращення точності потрібно сформулювати нові методи тренування, більш потужніші пристрої для проведення процесу навчання та новіші дані/зображення для покращення розуміння міміки людей системою. Перевірка результату тренування та передбачення моделі зображено на рис. 10. Спочатку, була вказана емоція, яку бажаємо отримати від моделі, а потім сама модель намагається передбачити емоцію, аналізуючи картинку та міміку людини яка зображена на фото. Очікуваний результат – це сум. Модель вказала, що це сум, а отже вона досить добре відрізняє емоції по фото. Ще один приклад емоції зображено на рис. 11. Очікуваний результат – відраза, що система нам і показала.

Отже, результат тренування є досить високим так, як модель здатна розпізнати емоції на картинках.

Ще один спосіб перевірити модель – це протестувати її у реальному часі, щоб упевнитись чи відповідає модель нашим вимогам, чи ні. Результат перевірки зображений на рис. 12.

```
[6]: from keras.utils import to_categorical
      from keras_preprocessing.image import load_img
      from keras.models import Sequential
      from keras.layers import Dense, Conv2D, Dropout, Flatten, MaxPooling2D
      import os
      import pandas as pd
      import numpy as np
```

Рис. 6. Завантаження пакетів для Python

```
[10]: train_features = extract_features(train['image'])
      100% ██████████ 28821/28821 [08:34<00:00, 80.38it/s]
      C:\Users\timha\AppData\Local\Programs\Python\Python311\Lib\site-packages\keras
      ease use color_mode = "grayscale"
      warnings.warn('grayscale is deprecated. Please use '
[11]: test_features = extract_features(test['image'])
      100% ██████████ 7066/7066 [02:04<00:00, 70.87it/s]
```

Рис. 7. Процес завантаження зображень

```
model = Sequential()  
# convolutional layers  
model.add(Conv2D(128, kernel_size=(3,3), activation='relu', input_shape=(48,48,1)))  
model.add(MaxPooling2D(pool_size=(2,2)))  
model.add(Dropout(0.4))  
  
model.add(Conv2D(256, kernel_size=(3,3), activation='relu'))  
model.add(MaxPooling2D(pool_size=(2,2)))  
model.add(Dropout(0.4))  
  
model.add(Conv2D(512, kernel_size=(3,3), activation='relu'))  
model.add(MaxPooling2D(pool_size=(2,2)))  
model.add(Dropout(0.4))  
  
model.add(Conv2D(512, kernel_size=(3,3), activation='relu'))  
model.add(MaxPooling2D(pool_size=(2,2)))  
model.add(Dropout(0.4))  
  
model.add(Flatten())  
# fully connected layers  
model.add(Dense(512, activation='relu'))  
model.add(Dropout(0.4))  
model.add(Dense(256, activation='relu'))  
model.add(Dropout(0.3))  
# output layer  
model.add(Dense(7, activation='softmax'))
```

Рис. 8. Налаштування моделі для тренування

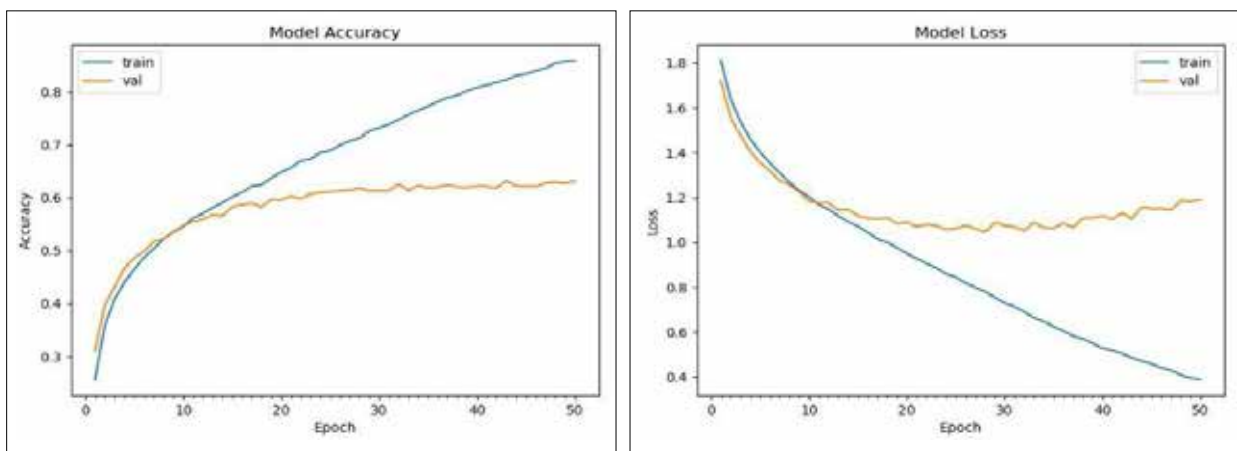


Рис. 9. Точність моделі



Рис. 10. Передбачення емоції (Сум)



Рис. 11. Передбачення емоції (Відраза)



Рис. 12. Передбачення емоції у реальному часі

**Висновки.** У даному дослідженні було розглянуто проблематику розпізнавання міміки людини та проаналізовано спосіб, що допоможе вирішити цю проблему та дозволить покращити взаємодію людини та машини у майбутньому. Було створено модель, яка розпізнає емоції людини у реальному часі. Модель було навчено за допомогою нейромережі та відкри-

тої бази даних із зображенням емоцій різних людей. Систему було протестовано на статичних зображеннях та у форматі реального відеопотоку.

Було проведено аналіз точності моделі та варіанти її можливого покращення. Загалом, модель показала досить непогані результати у розпізнаванні емоцій.

#### Список літератури:

1. Zhang Ke, et al. Real-time video emotion recognition based on reinforcement learning and domain knowledge. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. 2021. № 32.3. P. 1034–1047.
2. Hassouneh Aya, Mutawa A. M., Murugappan M. Development of a real-time emotion recognition system using facial expressions and EEG based on machine learning and deep neural network methods. *Informatics in Medicine Unlocked*. 2020. Vol. 20. P. 1057–1120.
3. Ozdemir, Mehmet Akif et al. Real time emotion recognition from facial expressions using CNN architecture. In: *2019 medical technologies congress (tiptekno)*. IEEE. 2019. P. 1–4.

4. Lech Margaret et al. Real-time speech emotion recognition using a pre-trained image classification network: Effects of bandwidth reduction and companding. *Frontiers in Computer Science*. 2020. Vol. 2. P. 1–14.
5. Pathar Rohit, et al. Human emotion recognition using convolutional neural network in real time. In: *2019 1st International Conference on Innovations in Information and Communication Technology (ICIICT)*. IEEE. 2019. P. 1–7.
6. Pang Bo, Nijkamp Erik, WU Ying Nian. Deep learning with tensorflow: A review. *Journal of Educational and Behavioral Statistics*. 2020. vol. 45.2. P. 227–248.
7. Grattarola, Daniele, Alippi, Cesare. Graph neural networks in tensorflow and keras with spektral [application notes]. *IEEE Computational Intelligence Magazine*. 2021. Vol. 16.1. P. 99–106.
8. Keshri, Ashish, et al. Automatic detection and classification of human emotion in real-time scenario. *Journal of IoT in Social, Mobile, Analytics, and Cloud*. 2022. Vol. 4.1. P. 41–53.
9. Raschka, Sebastian, Patterson, Joshua, Nolet, Corey. Machine learning in python: Main developments and technology trends in data science, machine learning, and artificial intelligence. *Information*. 2020. Vol. 11.4. P. 40–193.
10. Khare, Smith K., Bajaj, Varun. Time–frequency representation and convolutional neural network-based emotion recognition. *IEEE transactions on neural networks and learning systems*. 2020. Vol. 32.7. P. 2901–2909.
11. Muller-Putz, Gernot R. Electroencephalography. *Handbook of Clinical Neurology*. 2020. Vol. 168. P. 249–262.
12. Kaya, Davut, et al. Swin-Phog-LPQ: An accurate computed tomography images classification model using Swin architecture with handcrafted features. *Biomedical Signal Processing and Control*. 2023. Vol. 86. P. 105–108.
13. Deabes, Wael, Sheta, Alaa, Braik, Malik. ECT-LSTM-RNN: An electrical capacitance tomography model-based long short-term memory recurrent neural networks for conductive materials. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 76325–76339.
14. Hosseini, Sepidehsadat; CHO, Nam Ik. GF-CapsNet: Using gabor jet and capsule networks for facial age, gender, and expression recognition. In: *2019 14th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition (FG 2019)*. IEEE. 2019. P. 1–8.
15. Jin, Xuesong; Du, Xin; Sun, Huiyuan. VGG-S: Improved Small Sample Image Recognition Model Based on VGG16. In: *2021 3rd International Conference on Artificial Intelligence and Advanced Manufacture (AIAM)*. IEEE, 2021. P. 229–232.
16. Khairuddin, Yousif; Chen, Zhuofa. Facial emotion recognition: State of the art performance on FER2013. *arXiv preprint arXiv:2105.03588*, 2021. P. 170–175.
17. Wang, Jiawei; Li, Li; Zeller, Andreas. Better code, better sharing: on the need of analyzing jupyter notebooks. In: *Proceedings of the ACM/IEEE 42nd international conference on software engineering: new ideas and emerging results*. 2020. P. 53–56.
18. Larradet, Fanny, et al. Toward emotion recognition from physiological signals in the wild: approaching the methodological issues in real-life data collection. *Frontiers in psychology*. 2020. Vol. 11. P. 1111.
19. Bock, Sebastian; WEIß, Martin. A proof of local convergence for the Adam optimizer. In: *2019 international joint conference on neural networks (IJCNN)*. IEEE. 2019. P. 1–8.

#### **Isaiev T.S., Kysil T.M. A METHOD FOR RECOGNIZING HUMAN EMOTIONS IN REAL TIME USING MACHINE VISION**

Nowadays, there are different methods and different features that can be used to recognize faces and emotions, such as face, text, speech, and so on. Facial expression is the best among them. Emotion detection has also been widely used in many fields such as understanding human behavior, detecting mental disorders, detecting the emotions of people in a crowd, and so on. In the proposed concept, face emotion recognition can be divided into three stages. At the first stage, a human face is detected in the camera image, then at the second stage, the input data is analyzed based on features using a convolutional neural network (CNN) model. At the last stage, human emotions are classified into 7 main categories: fear, anger, disgust, sadness, surprise, neutral, and joy. Thus, the proposed model is divided into three main goals: face detection, face recognition, and emotion classification. Face recognition has many important applications in various fields, such as identity verification, security, biometrics, smart cards, surveillance systems, etc. Facial expressions convey non-verbal signals that play an important role in interpersonal relationships. The Cognitive Emotion AI system is a process of identifying a person's emotional state. The main goal of our research is to develop a robust system that can detect and recognize human emotions from live broadcasts. The methodology of this system is based on two stages – face recognition is performed by extracting the Haar cascade and recognizing facial features using the Viola-Jones algorithm, and then emotion verification and recognition is performed using artificial intelligence methods. The system takes an image or a frame as input, and by analyzing the

*model image, preprocessing and facial feature extraction is performed, after which the system predicts the emotional state. We have developed a convolutional neural network to classify human emotions from dynamic facial expressions in real time. We trained our system using the Tensorflow model, which was trained to classify human emotions. We used an open database of images to train the model, as well as our own photos to improve the results. A live video stream was connected to display the results. The results demonstrate the possibility of using neural networks in real time to detect human emotions.*

**Key words:** *emotion recognition, analytics, model training, real-time, machine learning, artificial intelligence.*

**Каменський А.О.**

Черкаський державний технологічний університет

## РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ВЕБ-ДОДАТКУ ДЛЯ АНАЛІЗУ РЕЗУЛЬТАТІВ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕЛЕКТРОННО-КАТАЛІТИЧНОЇ КОНВЕРСІЇ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ

*Застосування комп'ютерних технологій в сучасних дослідженнях хімічної галузі є надзвичайно актуальним і необхідним процесом. На сьогодні існують комп'ютерні програми, які здатні обробляти результати експериментів, створювати графічні залежності та аналізувати одержану інформацію. Однак є ряд досліджень, в яких доцільно використовувати програми, написані безпосередньо для аналізу даних, отриманих в результаті певних експериментальних розробок.*

*В даній статті розроблено веб-додаток, який створено для опрацювання результатів досліджень електронно-каталітичної конверсії вуглекислого газу в органічні сполуки, отриманих після аналізу на спектрофотометрі, у вигляді графічних залежностей та Excel таблиць. Оскільки дослідження з утилізації діоксиду вуглецю проводились за різних умов і параметрів, великий обсяг одержаних даних потребував комп'ютерної обробки. При створенні веб-додатку зроблено теоретичний огляд існуючого програмного забезпечення, яке застосовується в хімічній галузі.*

*Для написання програми було обрано мову JavaScript, як одну з сучасних, динамічних, прототипних та об'єктно-орієнтованих мов програмування, що застосовується при розробці веб-сторінок. Для оптимізації роботи інтерфейсу програми, гнучкості коду та подальшому розширенні функціональності додатку використано фреймворк Vue. Візуалізацію даних створено за допомоги мов програмування HTML5 та CSS3. При роботі з Excel таблицями підключено бібліотеку Sheet.js.*

*Створений веб-додаток дає можливість швидко опрацьовувати великі обсяги результатів, що отримані при спектрофотометричному аналізі проб синтезованих речовин, відфільтровувати дані, розраховувати концентрації речовин. Програму може бути застосовано не тільки для визначення метанолу та формальдегіду, але і для інших органічних речовин, що синтезовані в пробах. Комп'ютерна обробка експериментальних даних є необхідною складовою досліджень конверсії вуглекислого газу плазмо-каталітичним методом з використанням бар'єрного розряду.*

**Ключові слова:** веб-додаток, Excel таблиці, електронно-каталітична конверсія, спектрофотометр, комп'ютер, вуглекислий газ, програмне забезпечення, JavaScript.

**Постановка проблеми.** Сучасні наукові дослідження, в основних своїх рисах, суттєво відрізняються від тих, якими були нещодавно. Вони набувають нових форм, засобів реалізації, мають більш чітку та уніфіковану структуру. І тут значну роль відіграють в дослідницькій роботі новітні інформаційні технології. Застосування комп'ютерної техніки, програмного забезпечення надзвичайно оптимізують як теоретичну частину досліджень, так і практичну обробку результатів. На сьогодні експериментальна робота, значною мірою, орієнтована на використання комп'ютера та Інтернету для опрацювання сучасних методів, методик та технологій виконання експерименту.

В експериментальних розробках, які проводяться в хімічній галузі, застосування комп'ютерних програм значно полегшують пошук інформації, моделювання експерименту, роботу з обчисленням результатів, зберігання

даних та їх аналіз. І, не зважаючи на різноманіття програмного забезпечення, часто існує потреба в написанні програми під певні вузьконаправлені дослідження.

Проблематика роботи – впровадження веб-додатку для комп'ютерної обробки результатів, отриманих при експериментальних дослідженнях електронно-каталітичної конверсії діоксиду вуглецю в продукти органічного синтезу (метанол і формальдегід) [1, с. 73]. Для аналізу проб застосовувався прилад спектрофотометр, дані з якого виводились у вигляді Excel таблиць, що мали великий об'єм інформації, яка потребувала фільтрації та додаткового математичного обрахунку для визначення концентрації синтезованих речовин. Так як математичне обчислення даних займало багато часу і місця, постала необхідність у створенні відповідного веб-додатку для відфільтрування, обрахунку і оптимізації даних.

Об'єктом дослідження є застосування програмного забезпечення для аналізу результатів експериментів в хімічній технології.

Предметом дослідження є розробка веб-додатку для обробки даних отриманих після спектрофотометричного аналізу проб на вміст метанолу та формальдегіду при електронно – каталітичній конверсії вуглекислого газу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогодні існує достатньо великий спектр програмного забезпечення, що використовується в хімії та хімічному аналізі. Широкий огляд матеріалу надано в конспекті лекцій «Комп'ютерні та інформаційні технології в хімії» під редакцією С.О. Коновалової. В ньому розглядаються комп'ютерні програми для створення хімічних формул, трьохмірної візуалізації молекул та відтворення органічних та неорганічних речовин: ChemOffice (ChemDraw, Chem3D, ChemFinder) ChemWindow, ACD/ChemSketch Free-ware for personal or academic use, ChemSketch, MarvinSketch і т.д.. Окрему увагу автор приділяє базам даних та хімічним каталогам, які користувач може знайти в Інтернеті у вільному доступі: PubChem, ChemSpider, NIST Chemistry WebBook, Organic Syntheses, Merck та інші [2]. В науковому посібнику авторів Винник О.Ф., Свечнікова О.М., Грановська Т.Я. детально аналізується програмне забезпечення ACD/ChemSketch (Freeware) 12.0, основне призначення якого – моделювання структур молекул та визначення їх параметрів, написання формул різних органічних сполук, розглядаються рівняння реакцій та їх механізми [3]. В хімічних дослідженнях важливу роль мають не тільки результати експериментів, а й аналіз даних, які були отримані. Нині існує багато програм для наукових розрахунків та статистичного аналізу даних, які є необхідними для розробників, експериментаторів, наукових співробітників, що передбачає роботу з масивами інформації, розрахунками [4; 5]. Серед яких можна відмітити такі програми як Minitab, StatSoft(Statistica), Comsol, Microsoft Excel та багато інших. Безпосередньо, в хімічній галузі, розроблено програмне забезпечення, що може забезпечувати роботу лабораторій аналітичного та науково-технічного характеру, а саме: збір та обробку даних, передачу результатів від всіх типів приладів (лабораторні ваги, іономери, титратори, аналізатори (AAS, ICP), хроматографи, спектрофотометричні інструменти (УФ, ІЧ), а також від будь-яких інших приладів в лабораторії), управління всіма видами хроматографів, ведення електронних журналів. Як приклад, можна відмітити програми: LogiLabPRO, Kalabie, Openlab ECM, Openlab ICM, Openlab Intelligence Reporter (OLIR) [6].

**Постановка завдання.** Метою роботи є створення комп'ютерного додатку для обрахунку результатів досліджень за темою наукової роботи «Електронно-каталітична конверсія вуглекислого газу в продукти органічного синтезу» при обробці результатів спектрофотометричним методом аналізу.

**Виклад основного матеріалу.** Експериментальна робота пов'язана з такою глобальною проблемою як боротьба з парниковим ефектом, який зумовлений рекордно високим рівнем концентрації вуглекислого газу в атмосфері Землі, що сприяє глобальному потеплінню та більш частим екстремальним погодним явищам [7]. Способів утилізації та переробки CO<sub>2</sub> існує досить багато (звичайне термічне перетворення вуглекислого газу, сонячна термохімічна конверсія, фотохімічне перетворення, біохімічна конверсія, електрохімічне перетворення, плазмова технологія перетворення вуглекислого газу і т.д.) і кожен з них може бути використаний, в залежності від поставленої мети [8, с. 82]. Дана стаття базується на дослідженнях конверсії вуглекислого газу із застосуванням плазмо-каталітичної технології при використанні бар'єрного розряду. Плазмова технологія для переробки вуглекислого газу є сучасним і перспективним напрямом досліджень [9]. Аспект хімічної частини (переваги методу, фізико-хімічні основи) дослідження описується в статті [1]. На сьогодні розроблена методика, технологічна схема лабораторної установки, отримані позитивні результати при різних параметрах процесу конверсії оксидів вуглецю в органічні сполуки методом плазмового каталізу з використанням бар'єрного розряду [1]. Визначення наявності метанолу та формальдегіду в дослідних зразках проводився спектрофотометричним методом аналізу. В сучасних хімічних дослідженнях спектрофотометрію широко використовують для аналізу органічних і неорганічних речовин, якісного і кількісного визначення різних речовин, для контролю за протіканням технологічних процесів [10]. Варіювання технологічними параметрами, застосування різних каталізаторів при експериментальних дослідженнях – все це створило велику кількість результатів, які виводились у вигляді Excel таблиць після аналізу на спектрофотометрі UV-5800PC (рис. 1).

Опрацювання таблиць і подальший розрахунок проводився вручну, математично, що і послугувало необхідністю в створенні комп'ютерного веб-додатку для оптимізації часу обчислень, виключення помилок в аналізі результатів, фільтрації даних.

| A    | B     | C       | D       | E       | F       | G       | H       |
|------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1387 | 207   | 0,154   | 0,2486  | 0,0919  | 0,0367  | 0,0538  | 0,323   |
| 1388 | 206,5 | 0,16    | 0,2578  | 0,0964  | 0,041   | 0,0576  | 0,3267  |
| 1389 | 206   | 0,16    | 0,2588  | 0,0964  | 0,0401  | 0,0586  | 0,327   |
| 1390 | 205,5 | 0,1665  | 0,2685  | 0,1021  | 0,0427  | 0,0623  | 0,3265  |
| 1391 | 205   | 0,1669  | 0,2681  | 0,1015  | 0,0435  | 0,062   | 0,3274  |
| 1392 | 204,5 | 0,1736  | 0,2793  | 0,1083  | 0,0464  | 0,0658  | 0,3304  |
| 1393 | 204   | 0,1726  | 0,2786  | 0,1074  | 0,045   | 0,0655  | 0,329   |
| 1394 | 203,5 | 0,179   | 0,2881  | 0,1122  | 0,0493  | 0,069   | 0,3318  |
| 1395 | 203   | 0,1781  | 0,288   | 0,1122  | 0,0482  | 0,0691  | 0,3312  |
| 1396 | 202,5 | 0,1831  | 0,2953  | 0,1147  | 0,0497  | 0,0719  | 0,331   |
| 1397 | 202   | 0,1835  | 0,2954  | 0,1152  | 0,0502  | 0,0709  | 0,3314  |
| 1398 | 201,5 | 0,1886  | 0,3032  | 0,1198  | 0,0526  | 0,0741  | 0,3334  |
| 1399 | 201   | 0,1886  | 0,3038  | 0,1197  | 0,0524  | 0,0734  | 0,3327  |
| 1400 | 200,5 | 0,1942  | 0,3096  | 0,1239  | 0,054   | 0,0762  | 0,3349  |
| 1401 | 200   | 0,1948  | 0,3098  | 0,1243  | 0,0544  | 0,0766  | 0,3346  |
| 1402 | 199,5 | 0,1994  | 0,3146  | 0,1252  | 0,0549  | 0,078   | 0,334   |
| 1403 | 199   | 0,2001  | 0,3151  | 0,1256  | 0,0556  | 0,0779  | 0,3342  |
| 1404 | 198,5 | 0,2013  | 0,3173  | 0,1277  | 0,056   | 0,0768  | 0,3332  |
| 1405 | 198   | 0,2016  | 0,3174  | 0,1275  | 0,0558  | 0,0778  | 0,3333  |
| 1406 | 197,5 | 0,2041  | 0,3185  | 0,1264  | 0,0533  | 0,0761  | 0,3304  |
| 1407 | 197   | 0,2038  | 0,3182  | 0,1265  | 0,0532  | 0,0765  | 0,3309  |
| 1408 | 196,5 | 0,208   | 0,3227  | 0,1291  | 0,0569  | 0,0771  | 0,3319  |
| 1409 | 196   | 0,2075  | 0,3221  | 0,129   | 0,056   | 0,0764  | 0,331   |
| 1410 | 195,5 | 0,2096  | 0,3196  | 0,126   | 0,0524  | 0,0726  | 0,3274  |
| 1411 | 195   | 0,2094  | 0,3201  | 0,126   | 0,0524  | 0,0737  | 0,328   |
| 1412 | 194,5 | 0,2105  | 0,319   | 0,1229  | 0,0493  | 0,0705  | 0,324   |
| 1413 | 194   | 0,2107  | 0,3193  | 0,1233  | 0,0495  | 0,0718  | 0,3246  |
| 1414 | 193,5 | 0,2128  | 0,3208  | 0,1247  | 0,049   | 0,0706  | 0,3187  |
| 1415 | 193   | 0,2138  | 0,3215  | 0,1254  | 0,0497  | 0,07    | 0,3188  |
| 1416 | 192,5 | 0,2194  | 0,3241  | 0,1227  | 0,0492  | 0,0696  | 0,318   |
| 1417 | 192   | 0,2194  | 0,3249  | 0,122   | 0,0492  | 0,0693  | 0,3177  |
| 1418 | 191,5 | 0,2232  | 0,3262  | 0,1209  | 0,0479  | 0,0686  | 0,3144  |
| 1419 | 191   | 0,222   | 0,3249  | 0,121   | 0,047   | 0,069   | 0,3142  |
| 1420 | 190,5 | 0,229   | 0,3238  | 0,1152  | 0,0428  | 0,0668  | 0,3056  |
| 1421 | 190   | -0,1156 | -0,0301 | -0,2208 | -0,2874 | -0,2656 | -0,0464 |

Рис. 1. Максимальні значення в кожній пробі Excel файлу

**Розрахунок концентрацій органічних речовин до впровадження веб-додатку (приклад).** В Excel таблиці колонка А відповідає за номер позиції, колонка В – довжина хвилі, в колонках С, D, E, F, G, H знаходяться проаналізовані результати проб. В кожній з цих колонок (С – Н) знаходимо максимальне значення (рис. 1). Для прикладу візьмемо максимальне значення з колонки С (D=0,229).

Далі, використовуючи графічну залежність оптичної густини метанолу (або формальдегіду) від довжини хвилі (рис. 2), (рис. 3), визначаємо максимальне значення оптичної густини еталонного розчину (метанолу, формальдегіду). Спектр поглинання еталонного розчину речовини знаходимо експериментально, вимірюючи оптичну густину при різних значеннях довжини хвилі.



Рис. 2. Спектр поглинання еталонного розчину метанолу



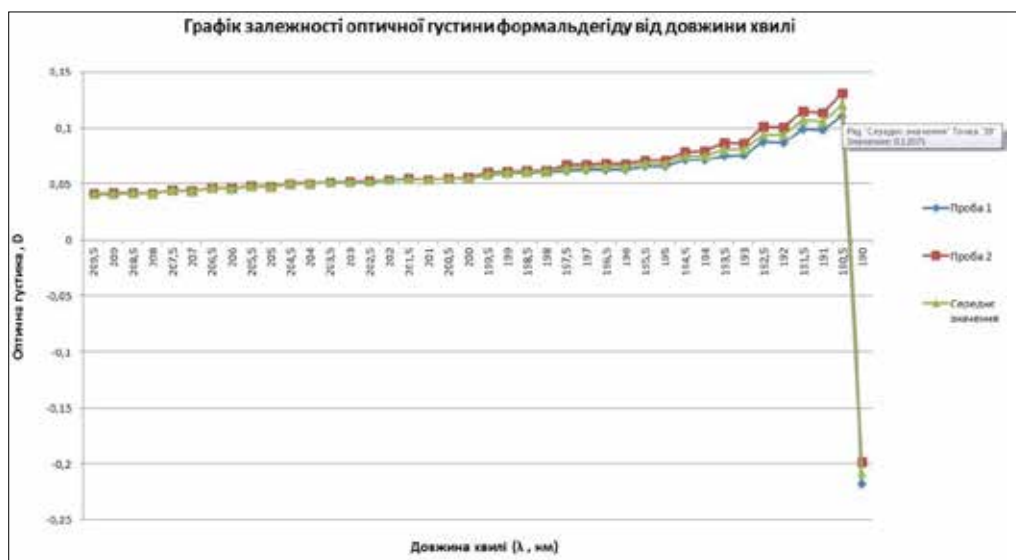


Рис. 3. Спектр поглинання еталонного розчину формальдегіду

Максимальне значення для оптичної густини еталонного розчину метанолу становить по графіку  $D_{ст} = 0,03355$ . Дане значення підставляємо в формулу (1) для обрахунку концентрації метанолу в аналізованих пробах.

Для визначення формальдегіду все проводиться аналогічно, використовуючи графік спектру поглинання еталонного розчину формальдегіду ( $D_{ст} = 0,12075$ ).

$$x = \frac{C_{em} \cdot D}{D_{em}}, \quad (1)$$

де  $C_{ст}$  – еталонна концентрація, г/дм<sup>3</sup>;

$D$  – оптична густина досліджуваної речовини аналізуємої проби;

$D_{ст}$  – оптична густина для еталонного розчину.

Приймаємо:  $x$  – концентрація формальдегіду, г/дм<sup>3</sup>;

$y$  – концентрація метанолу, г/дм<sup>3</sup>.

Розрахунок концентрацій формальдегіду і метанолу в пробі, що аналізується:

$$x = \frac{0,1 \cdot 0,229}{0,12075} = 0,1896 \text{ г / дм}^3;$$

$$y = \frac{0,1 \cdot 0,229}{0,03355} = 0,6825 \text{ г / дм}^3;$$

**Вебдодаток.** Для створення веб-додатку була застосована мова JavaScript – динамічна, об’єктно-орієнтована прототипна мова програмування з використанням фреймворку Vue 3. Основні особливості цієї мови – гнучкість роботи з функціями та універсальність. JavaScript підтримується всіма сучасними браузерами, легко інтегрується з версткою (HTML) та дає змогу налаштувати комунікацію з сервером. Серед

переваг JavaScript можна відмітити: тип даних визначається, коли змінній або константі присвоюється значення; функції можна як виконувати, так і повертати, передавати їх як параметри іншим функціям і привласнювати як значення змінних. Методологія об’єктно-орієнтованого програмування дає змогу представити програму у вигляді сукупності об’єктів. Дозволяє частково перенести бізнес-логіку із сервера на сторону користувача, тобто виконувати код в браузері, що своєю чергою зменшує навантаження на сервери [11]. JavaScript має розвинену інфраструктуру, дає можливість працювати з великою кількістю бібліотек, фреймворків як React, Angular і Vue, декількома пакувальниками, як Webpack, Gulp, та допоміжними бібліотеками як Lodash, axios [11; 12].

Vue – це платформа JavaScript для створення інтерфейсів користувача. Він створений на основі стандартних HTML, CSS і JavaScript і забезпечує декларативну модель програмування на основі компонентів, допомагаючи ефективно розробляти інтерфейс користувача будь-якої складності [13]. Vue охоплює більшість загальних функцій, необхідних для розробки інтерфейсу. Однією з його переваг є гнучкість і поступова адаптивність до змін. Даний фреймворк можна використовувати для розширення статичного HTML, вбудовування як веб-компонента на будь-яку сторінку, створення односторінкового додатку (SPA), фулстек / додаток з рендерингом на стороні серверу (SSR), Jamstack / генерація статичного додатку (SSG), створення десктопних, мобільних, WebGL додатків і навіть додатків для терміналу [13].

```
chooseFile(event) {
  this.selectedFile = event.target.files[0];
},
```

Рис. 4. Функція вибору файлу

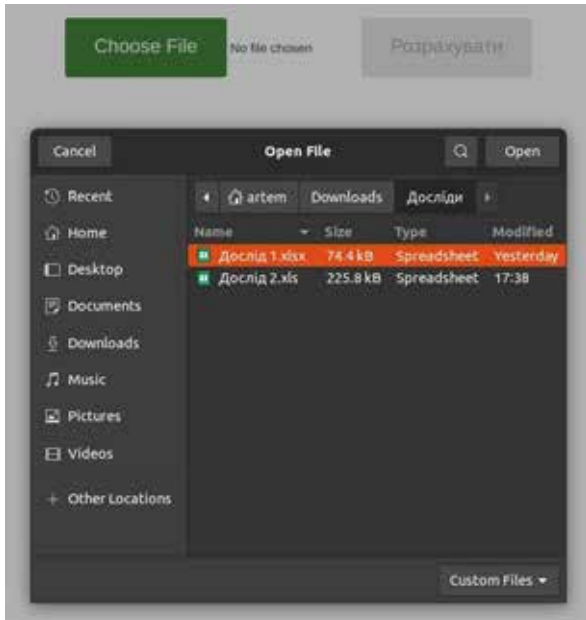


Рис. 5. Вибір excel файлу

Для візуалізації даних використано мову розмітки гіпертексту HTML5 та CSS3 – мова стилю сторінок, що використовується для опису їхнього зовнішнього вигляду. Для отримання даних з Excel файлу в програму було підключено бібліотеку Sheet.js з відкритим вихідним кодом. Основні етапи програми:

**1. Вибір Excel файлу.** Вносимо в програму Excel файл який отримуємо наприкінці досліді при аналізі на спектрофотометрі. Він містить в собі велику кількість даних. Для зчитування інформації потрібно натиснути на кнопку Choose File (рис. 4) після чого обираємо потрібний нам файл (рис. 5).

Програма дозволяє вносити файли з розширенням .xls та .xlsx. Це зроблено за допомогою спеціального атрибуту accept в тегу input.

**2. Розрахунок.** Далі натискаємо кнопку **Розрахувати**, ця кнопка заблокована поки не буде внесено файл. Після чого отриманий масив обрізаємо за допомогою методу slice (рис. 6). Прибираємо з масиву непотрібні дані, які будуть заважати знайти максимальне значення та переводимо дані в числовий тип:

**3. Знаходження максимального значення.** Після обрізки масиву обчислюємо максимальне значення та додаємо в масив maxValues (рис. 7).

```
this.columnValues.slice(50, this.columnValues.length).forEach(i => {
  this.slicedArray.push(Number(i.toString().replace( searchValue: ',', replaceValue: '.')));
});
```

Рис. 6. Обрізка масиву

```
this.maxValues.push(Math.max.apply( thisArg: null, this.slicedArray));
```

Рис. 7. Додавання у масив maxValues максимальних значень

```
this.maxValues.forEach(i => {
  this.calculationResults(i, number: 0.03355, this.methanolResults);
  this.calculationResults(i, number: 0.12075, this.formaldehydeResults);
});
```

Рис. 8. Перебір масиву та виклик функції calculationResults

```
calculationResults(value, number, array) {
  let result = (0.1 * value)/number;

  array.push(Math.trunc( x:result * 10000 ) / 10000);
},
```

Рис. 9. Функція обрахунку результатів

Масив з максимальними значеннями перебирається за допомогою методу `forEach`, де кожне зі значень потрапляє в функцію `calculationResults`, в якій відбувається обрахунок концентрацій метанолу та формальдегіду (рис. 8).

Функція `calculationResults` приймає в себе 3 аргументи. Перший, `value` – максимальне значення знайдене в стовбці; другий аргумент, `number` – це

оптична густина для еталонного розчину; третій аргумент, `array` – масив окремо створений для значень метанолу та формальдегіду. В середині функції присутня формула визначення концентрації метанолу та формальдегіду. Наприкінці функції дані обрізаються до десяти тисячних та додаються в масив (рис. 9).

Далі, отримані дані візуалізуються на екрані у вигляді таблиці (рис. 10).

| Дослід 1.xlsx            |                          | Дослід 2.xlsx            |                          |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Метанол                  | Формальдегід             | Метанол                  | Формальдегід             |
| 0.6925 г/дм <sup>3</sup> | 0.1896 г/дм <sup>3</sup> | 0.6378 г/дм <sup>3</sup> | 0.1772 г/дм <sup>3</sup> |
| 0.9722 г/дм <sup>3</sup> | 0.2701 г/дм <sup>3</sup> | 0.9472 г/дм <sup>3</sup> | 0.2631 г/дм <sup>3</sup> |
| 0.3847 г/дм <sup>3</sup> | 0.1069 г/дм <sup>3</sup> | 0.4745 г/дм <sup>3</sup> | 0.1318 г/дм <sup>3</sup> |
| 0.1695 г/дм <sup>3</sup> | 0.0471 г/дм <sup>3</sup> | 0.4131 г/дм <sup>3</sup> | 0.1147 г/дм <sup>3</sup> |
| 0.2324 г/дм <sup>3</sup> | 0.0645 г/дм <sup>3</sup> | 0.2795 г/дм <sup>3</sup> | 0.0776 г/дм <sup>3</sup> |
| 0.9982 г/дм <sup>3</sup> | 0.2773 г/дм <sup>3</sup> | 0.3025 г/дм <sup>3</sup> | 0.084 г/дм <sup>3</sup>  |

Рис. 10. Візуалізація результатів

**Висновки.** Дана робота є прикладом оптимізації та цифровізації експериментальних даних при їх аналізі, отриманих в результаті досліджень технології конверсії вуглекислого газу в продукти органічного синтезу без використання дороговартісного програмного забезпечення.

В наукових дослідженнях хімічного напрямку важливу роль має комплексна робота, тобто потрібно не тільки розробити експеримент, створити технологічну схему, проаналізувати на приладах отримані дані, а й, застосувавши програмне

забезпечення або комп'ютерний додаток, розрахувати та відфільтрувати найбільш оптимальні результати. Розроблений веб-додаток вирішує проблему роботи з великим обсягом даних, які отримуємо в кінці експерименту, пришвидшує їх обробку, економить час для аналізу отриманої інформації. Веб-додаток має версію для комп'ютерів, планшетів та смартфонів. Він також є масштабуємим і в подальшому планується можливість додати функції архівації результатів або їх видалення, введення графіків та інших додаткових можливостей.

#### Список літератури:

1. Kamensky A., Olshevsky O., Pochynok V., Viazovyyk, V. (2021). Electrocatalytic Processing of Carbon Dioxide into Methanol and Formaldehyd. *Science and Innovation*. № 17 (5). P. 73–82. <https://doi.org/10.15407/scine17.05.073>
2. Комп'ютерні та інформаційні технології в хімії: стислий конспект лекцій для студентів спеціальності 102 «Хімія» денної форми навчання / уклад. С. О. Коновалова. Краматорськ : ДДМА, 2020. 80 с.
3. Винник О. Ф. Застосування програмного засобу ACD/ChemSketch (Freeware) 12.0 для написання хімічних формул та моделювання хімічних процесів [Електронний ресурс] : навч. посіб. / О. Ф. Винник, О. М. Свечнікова, Т. Я. Грановська ; за ред. Колісника С. В., Панайотової Т. Д. Харків : ХНПУ, 2018. 92 с.
4. Роїк М. В., Присяжнюк О. І., Денисюк В. О. Огляд програмних засобів статистичного аналізу даних. URL: <http://www.economy.nauka.com.ua/?op=1&z=5676> (дата звернення: 25.05.2024).
5. 10 кращих програм та інструментів для статистики у 2022 році. URL: <https://ua.softlist.com.ua/articles/10-luchshikh-programm-i-instrumentov-dlia-statisiki-v-2022-godu/> (дата звернення 21.04.2024).
6. Список програмного забезпечення для науково-дослідних та аналітичних лабораторій. URL: <https://www.alsichrom.com/informatsionnye-resheniya-v-sovremennykh-laboratoriyakh/item/88->

programmnoe-obespechenie-dlya-nauchno-issledovatel'skikh-i-analiticheskikh-laboratorij.html (дата звернення 28.04.2024).

7. Екодія. Зміна клімату в Україні та світі: причини, наслідки та рішення для протидії. URL: [https://ecoaction.org.ua/zmina-klimatu-ua-ta-svit.html?gad\\_source=1&gclid=EAIaIQobChMIx6eC0YfChQMV96eDBx1\\_UQZqEAAAYASAAEgIjDPD\\_VwE](https://ecoaction.org.ua/zmina-klimatu-ua-ta-svit.html?gad_source=1&gclid=EAIaIQobChMIx6eC0YfChQMV96eDBx1_UQZqEAAAYASAAEgIjDPD_VwE) (дата звернення 25.05.2024).

8. Вязовик В. М., Починок В. В., Шинкаренко, Д. Ю. (2021). Класифікація технологій утилізації діоксиду вуглецю в умовах економіки замкнутого циклу. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. № 2. С. 82–107.

9. Ramses Snoeckx and Annemie Bogaerts. “Plasma technology – a novel solution for CO<sub>2</sub> conversion?”, *Chem. Soc. Rev.* 2017. № 46. P. 5805–5863. DOI: 10.1039/C6CS00066E

10. Л.М. Спасьонова, В.Ю. Тобілко, І.В. Пилипенко Інструментальні методи хімічного аналізу: навч. посіб. для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія» спеціалізації «Хімічні технології неорганічних керамічних матеріалів». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 69 с.

11. Чому JavaScript – перспективна мова програмування? Поради початківцям. URL: <https://dou.ua/forums/topic/35184/> (дата звернення: 24.05.2024).

12. Сучасний підручник з JavaScript. [Електронний ресурс]. URL: <https://uk.javascript.info/intro> (дата звернення: 24.05.2024).

13. What is Vue? URL: <https://vuejs.org/guide/introduction.html> (дата звернення: 25.05.2024).

### **Kamenskyi A.O. DEVELOPMENT OF A WEB-BASED SOFTWARE APPLICATION FOR ANALYZING THE RESULTS OF SPECTROPHOTOMETRIC STUDIES OF ELECTRON-CATALYTIC CONVERSION OF CARBON DIOXIDE**

*The use of computer technology in modern chemical research is an extremely relevant and necessary process. Today, there are computer programs that can process the results of experiments, create graphical dependencies, and analyze the information obtained. However, there are a number of studies in which it is advisable to use programs written directly for analyzing data obtained as a result of certain experimental developments.*

*This article describes a web application designed to process the results of studies of the electron-catalytic conversion of carbon dioxide into organic compounds obtained after analysis on a spectrophotometer in the form of graphical dependencies and Excel tables. Since the carbon dioxide utilization studies were conducted under different conditions and parameters, a large amount of data required computer processing. When creating the web application, a theoretical review of existing software used in the chemical industry was made.*

*To write the program, we chose JavaScript as one of the modern, dynamic, prototyping and object-oriented programming languages used in web page development. The Vue framework was used to optimize the program interface, code flexibility, and further expand the application's functionality. Data visualization was created using HTML5 and CSS3 programming languages. When working with Excel tables, the Sheet.js library is connected.*

*The developed web application makes it possible to quickly process large volumes of results obtained during the spectrophotometric analysis of samples of synthesized substances, filter data, and calculate substance concentrations. The program can be used not only for the determination of methanol and formaldehyde, but also for other organic substances synthesized in samples. Computer processing of experimental data is a necessary component of studies of carbon dioxide conversion by the plasma-catalytic method using a barrier discharge.*

**Key words:** web application, Excel spreadsheets, electron-catalytic conversion, spectrophotometer, computer, carbon dioxide, software, JavaScript.

УДК 658.5.015.23:681.5.015.24

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.1/16>

**Кондратець В.О.**

Центральноукраїнський національний технічний університет

**Сербул О.М.**

Центральноукраїнський національний технічний університет

**Мацуї А.М.**

Центральноукраїнський національний технічний університет

**Ярмоленко В.В.**

Центральноукраїнський національний технічний університет

## **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СТЕРЖНЕВОГО МОЛОЛЬНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ БАРАБАННОГО МЛИНА В КАСКАДНОМУ РЕЖИМІ ПОДРІБНЕННЯ РУДИ**

*Встановлено, що рух стержнів при роботі барабанного млина в каскадному режимі системно практично не вивчався. Приведені основні параметри, характеристики і особливості стержневих барабанних млинів. Моделювання виконано в межах розробки теми «Оптимізація продуктивності стержневих млинів розімкнутого циклу по руді і готовому продукту при мінімальних енергетичних і матеріальних перевитратах», яка є складовою наукової тематики Центральноукраїнського національного технічного університету. Тема статті актуальна. Метою роботи є математичне моделювання стержневого молольного завантаження барабанного млина в каскадному режимі подрібнення руди з встановленням розташування стержнів у поперечному перерізі, закономірностей їх руху, кутів природного ухилу, особливостей спрацювання вздовж барабана. Використані методи аналізу, порівняння, математичного моделювання, теорії подрібнення руди в кульових і стержневих млинах, методи теорії спрацювання металевих тіл при взаємодії з незакріпленим абразивом, методи кінетики подрібнення руди. Базою був стержневий млин МСЦ-35-55, який використовують на потужних залізрудних збагачувальних фабриках. Для такого млина найбільш характерним є каскадний режим роботи. Для такого і наближеного до нього режиму обертів барабана розглянуто розташування стержнів оптимального завантаження з трьох діаметрів різної величини. Розглянуті реалізації способів руйнування руди при каскадному переміщенні стержнів. Отримані моделі поперечних перерізів геометричних фігур з стержнів трьох діаметрів, що дало можливість встановити кути їх природного ухилу. Кути природного ухилу стержнів однакового діаметра дорівнюють  $60^\circ$  і не залежать від даного параметра. Встановлено механізм розпушення стержнів в процесі руху вздовж прямої ділянки траєкторії, нахиленої під кутом, близьким до кута природного ухилу молольних тіл. Здійснено виробничі дослідження стержневих млинів при подрібненні трьох характерних за міцністю технологічних різновидів руд з різною середньозваженою крупністю і незмінною рудною продуктивністю технологічного агрегату 190 т/год. Розглянута кінетика подрібнення такого матеріалу. Встановлено три зони інтенсивності подрібнення руди. В першій зоні подрібнюється сама крупна руда, в другій – середня, а в третій сама дрібна. В першій зоні відбувається одношарове подрібнення руди, у другій – в півтора – два з половиною шара, а в третій зоні здійснюється двох – п'ятишарове подрібнення. Показано, що в одношаровому подрібненні буде саме ефективно руйнування шматків руди і найбільше спрацювання стержнів в наслідок більших зусиль, прикладених стержнем в конкретній точці взаємодії з абразивом. Якщо при перекочуванні стержня між ним і металевою основою буде більше одного шару абразиву, ефект подрібнення і зносу молольних тіл зменшується. Ще меншими будуть ці ефекти у випадку значної кількості шарів абразиву. Тому в процесі подрібнення руди циліндричні стержні перетворюються в конічні і це необхідно враховувати. Поставлена мета досліджень досягнена.*

**Ключові слова:** стержневе молольне завантаження, каскадний режим, моделювання, кут природного ухилу, розпушення, конічність стержнів.

**Постановка проблеми.** Україна виробляє значну кількість залізорудної сировини для чорної металургії. Неухильне зменшення запасів багатих залізних руд з другої половини минулого століття привело до вироблення все більшої частки залізорудної сировини з бідних залізних руд шляхом їх збагачення. Такі процеси здійснюються в основному на магнітозбагачувальних фабриках, де вихідна руда подрібнюється до розкриття вкраплин корисного компонента. Особливо великі витрати при подрібненні вихідної руди здійснюються у перших стадіях. Це стосується електроенергії, металевих куль і футерівки. Перевитрати цих складових приводять до здорожчання кінцевої продукції – концентрата, що негативно впливає на стан економіки і України на міжнародному ринку даної продукції. Особливо складана ситуація складається при подрібненні міцних руд, де у відкритому циклі використовують стержневі млини, які достатньо складно обслуговувати порівняно з кульовими технологічними агрегатами. Складність полягає в тому, що стержні у млин дозавантажують при зупинці технологічного агрегату за допомогою кранів або спеціальних завантажувальних пристроїв молольними тілами різних діаметрів. На момент зупинки кількості стержнів і розміри їх діаметрів невідомі, що підвищує трудомісткість виконання даної роботи. Ускладнює обслуговування стержневих млинів і невизначеність руху молольного середовища, його спрацювання та необхідність перекласифікації стержнів через кожні 10 діб. Невирішеність даних завдань потребує проведення теоретичного моделювання стержневого молольного завантаження барабанного млина в каскадному режимі подрібнення руди. Це складає актуальність даної публікації. Дана робота виконана в межах тематики наукових досліджень Центральноукраїнського національного технічного університету за темою «Оптимізація продуктивності стержневих млинів розімкнутого циклу по руді і готовому продукту при мінімальних енергетичних і матеріальних перевитратах» (реєстраційний номер 0123U102622).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Стержневі млини досліджені порівняно мало, хоч з середини 60-х років минулого століття практично розв'язані основні задачі їх конструювання. Нині розроблений стержневий млин МСЦ-4500×6000, який досяг граничних розмірів для цих технологічних агрегатів. Зважаючи на відносно великий діаметр розвантажувальної горловини в барабанних стержневих млинах звичайно не виконують люків. В Україні в 1969 р.

вчені Дніпропетровського гірничого інституту О.М. Марюта і В.О. Бунько запропонували методику визначення статичних і регулювальних характеристик стержневих млинів, що працюють у відкритому циклі. В подальшому в основному науково-дослідні роботи спрямовуються в напрямку розробки гумової футерівки, однак стійких позитивних результатів для млинів першої стадії подрібнення руди поки що не досягнуто. В роботі [1] описані конструкції стержневого млина, завиткових живильників і футерівки. Приведені базові параметри технологічного агрегату. Крім цього розглянута схема руху подрібнюючих тіл в каскадному режимі роботи.

Математичне моделювання базових параметрів стержневого завантаження циліндричних млинів як керованих об'єктів [2] показало, що звичайно використовують багаторозмірне стержневе завантаження. В усталеному каскадному режимі роботи в центральній зоні зосереджуються стержні самого крупного розміру. В поперечному перерізі, поступово зменшуючись у діаметрі, з охопленням навколишнього простору розташовуються дрібніші молольні тіла. Периферійну область створюють стержні самого найменшого діаметра, притискуючись до внутрішньої поверхні барабана і охоплюючи все молольне завантаження. Зони однорозмірних молольних тіл в поперечному перерізі достатньо обширні, що дозволяє розглядати різнорозмірне стержневе завантаження як одне ціле. Встановлено, що в стержневому молольному середовищі розміщується 21,5 % об'єму руди. У кульовому однорозмірному завантаженні цей показник дещо вищий і складає 26 %, однак його складно утримувати в процесі експлуатації. Доведено, що імпульс ударного стиснення в стержневому завантаженні складає 14,026, що на 28,3 % вище порівняно з найкращим показником кульових технологічних агрегатів. Стержневий млин, виконуючи крупне, середнє і дрібне подрібнення руди, одночасно здійснює класифікацію за крупністю, що гарантує високу якість подрібнення і рівномірність середньозваженої крупності матеріалу у розвантаженні. Ще одним кроком покращення функціонування стержневих млинів, що працюють у відкритому циклі, може бути реалізація запропонованих заходів удосконалення рудного живлення, викладених в [3].

Отже, з розглянутого видно, що рух стержнів при роботі барабанного млина в каскадному режимі системно практично не досліджувався. Оскільки від нього залежить ефективність подрібнення руди, то слід виконати математичне

моделювання даних процесів і встановити основні закономірності переміщення стержнів в каскадному режимі, механізми руйнування часток руди на різних ділянках руху та спрацювання молольних тіл вздовж барабана.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є математичне моделювання стержневого молольного завантаження барабанного млина в каскадному режимі подрібнення руди, в результаті якого встановити розташування стержнів за розміром в поперечному перерізі барабана, закономірності їх руху на різних ділянках траєкторії, кути природного ухилу стержнів різних діаметрів і закономірності спрацювання молольних тіл вздовж барабана.

**Виклад основного матеріалу.** Стержневі барабанні млини досягли своїх найбільших розмірів, які в подальшому не будуть збільшуватись, оскільки при зростанні довжини стержні втрачають жорсткість, а їх вільний політ може приводити до перекосів і аварійної зупинки технологічного агрегату. В Україні діаметр барабана таких млинів складає 4,5 м, а його довжина – 6 м. В далекому зарубіжжі найбільші стержневі млини мають діаметр 4,6 м, а довжину 6,7 м.

Молольне завантаження в залежності від крупності вихідної руди формують зі стержнів діаметром від 45...50 мм до 100 мм. Однак, є дані, що можуть використовуватися стержні діаметром і до 125 мм. Здебільшого стержневе завантаження складають зі стержнів одного діаметра. Практикою доведено, що багаторозмірне стержневе завантаження барабанних млинів, наприклад, складене з молольних тіл трьох діаметрів, забезпечує вищі показники подрібнення руди порівняно з однорозмірним завантаженням. На відміну від кульових млинів, поздовжня сегрегація у стержневих млинах відбуватися не може.

Футерівка стержневих млинів виконується хвилястою. Даний профіль запобігає прослизанню молольного завантаження порівняно з гладким, циліндричним. У стержневих млинах використовують сталеву футерівку, її спрацювання може бути в межах 0,3...0,6 кг на тану подрібненої руди. Слугує сталева футерівка 6...8 місяців.

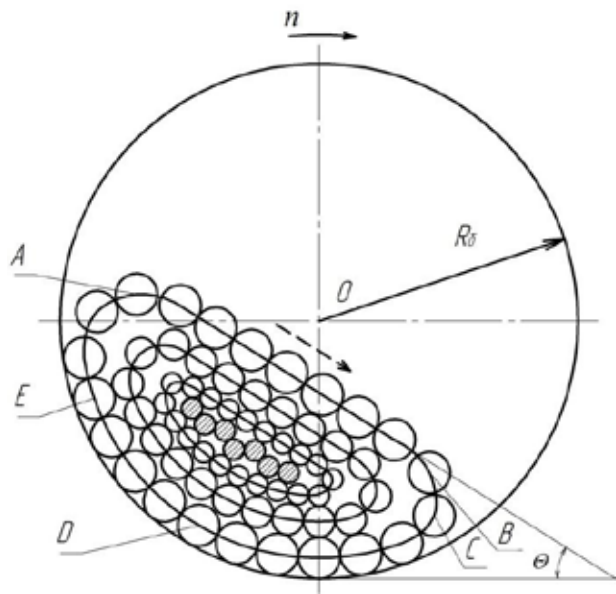
Стержневі барабанні млини подрібнюють вихідну руду в основному від 25 до 2 мм, однак бувають і інші варіанти. Характерною ознакою стержневих млинів є те, що вони, порівняно з кульовими, подрібнюють руду більш рівномірно. Це досягається завдяки тому, що крупні шматки руди розташовуються вздовж стержнів по лінії і при дії іншого стержня в першу чергу

руйнуються самі крупні куски, а більш дрібніші залишаються практично цілими. Тобто, у стержневному млині створюються сприятливі умови подрібнення в першу чергу крупних кусків руди, що ефективно вирівнює крупність твердого в його розвантаженні.

Для стержневих млинів найбільш сприятливим є каскадний режим, оскільки при змішаному та водоспадному режимі вільний політ стержнів може приводити до втрати паралельного переміщення молольних тіл при обертанні барабана, що часто приводить до аварійних ситуацій і зупинки технологічного агрегату. З іншого боку, каскадний режим руху млина дозволяє отримати більш тонке подрібнення в наслідок того, що руда подрібнюється в основному роздавлюванням і розтиранням [1]. Кульові млини в основному працюють у змішаному і водоспадному режимах. Кульові млини в каскадному режимі застосовують при сухому і мокрому подрібненні неміцних матеріалів в цементній галузі та підготовці пиловугільного палива на теплових електростанціях [1].

У монографії [1] дається практично близьке визначення каскадного режиму роботи барабанних млинів. Каскадний режим руху подрібнювальних тіл приведено на рис. 1. Він реалізується при малій частоті обертання барабана від 0,5 до 0,6 критичної та характеризується перекошуванням подрібнювальних тіл без їх польоту. У сталому каскадному режимі подрібнювальне середовище повертається на певний кут  $\Theta$  у бік обертання і залишається в цьому положенні. Подрібнювальні тіла безупинно циркулюють усередині барабана по замкненим траєкторіям. Криволінійна поверхня природного ухилу молольних тіл достатньо наближена до площини  $AB$ , яка нахилена під кутом  $\Theta$  до горизонту. Цей кут дещо перевищує кут природного ухилу молольних тіл. При циркуляції молольні тіла піднімаються по коловим траєкторіям  $CDE$  на певну висоту і потім скочуються «каскадом» рівнобіжними паралельними шарами вниз від точки  $A$  до точки  $C$ . У центральній частині подрібнювального середовища утворюється малорухома зона, в якій стержні заштриховані (рис. 1). Її звичайно називають «ядром». Навколо нього по замкненим неперервним траєкторіям циркулюють молольні тіла. Подрібнення матеріалу здійснюється стиранням і роздавлюванням.

Поняття «ядра» внесено О.М. Марютою в запропонованій ним моделі руху молольних тіл у барабанному млині. Її суть зводиться до наступного. В процесі обертання барабана частина внутрішньомлинового завантаження рухається по



**Рис. 1. Схема руху стержнів у каскадному режимі роботи барабанного млина:**

$R_0$  – внутрішній радіус барабана;  $n$  – швидкість обертання барабана;  $\Theta$  – кут, що дещо перевищує кут природного ухилу

коловим траєкторіям разом з барабаном, інша частина переміщується по траєкторіям польоту або сповзання.

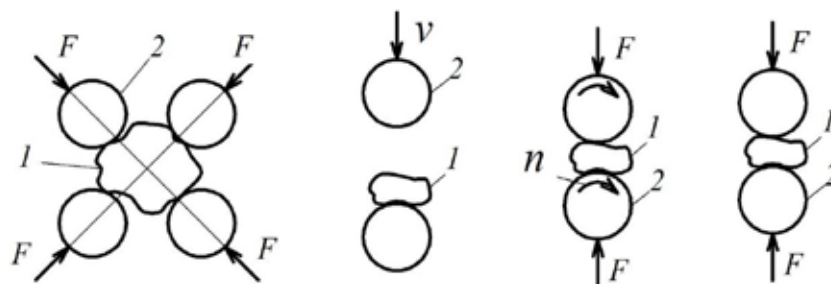
В центрі завантаження створюється формування, яке автор назвав центральним малорухомих ядром. Молольні засоби в ньому рухаються з невеликою швидкістю відносно зовнішніх рухомих шарів завантаження. Джерелом енергії тут є шари завантаження, які рухаються спільно з внутрішньою поверхнею барабана за рахунок фрикційного контакту.

У розглянутому визначенні каскадного режиму роботи барабанного млина акцентується увага на те, що подрібнювальні тіла в процесі каскадного руху перекочуються, в центральному малорухомих ядрі вони рухаються з порівняно невеликою

швидкістю, а навколо нього безупинно циркулюють по замкнених траєкторіям, при чому криволінійна поверхня природного ухилу молодільних тіл дещо перевищує кут вільного їх скошування. Це характеризує рух молодільного середовища в каскадному режимі.

Дослідження руху молодільних тіл в барабанних млинах в основному розглядалося на прикладі куль. Однак з розглянутого можливо легко зробити висновок, що аналогічно кулям будуть рухатися і стержні. Відмінність звичайно полягає в тому, що кульове завантаження має як поперечну так і поздовжню сегрегацію. Це в певній мірі спрощує розгляд стержневого завантаження барабанних млинів. Для каскадного режиму руху куль прийнято відмічати, що подрібнення руди здійснюється стиранням і роздавллюванням, однак це не зовсім так. Реалізація способів подрібнення руди при каскадному режимі руху стержнів показана на рис. 2. З нього видно, що тут задіяні чотири способи руйнування руди. На рис. 2, а приведено варіант подрібнення руди частковим різноспрямованим роздавллюванням, який реалізується в зоні руху куль по коловим траєкторіям (рис. 1). Зрозуміло, що продуктивність такого подрібнення порівняно мала. Подрібнення ударною дією показано на рис. 2, б, яке виникає при спусканні стержнів в каскадному русі по криволінійній стержневій поверхні. Масштаб такого руйнування шматків руди також порівняно незначний. Подрібнення стиранням (рис. 2, в) здійснюється в процесі спуску стержнів у сусідніх шарах, які скочуються зі швидкістю обертання  $n$ . У випадках, коли вертикальні складові сили  $F$  з боку стержнів співпадають і між ними знаходиться руда (рис. 2, г), то вона руйнується вертикальним роздавллюванням. Продуктивності подрібнення руди двома останніми способами є визначальними.

З визначення каскадного режиму роботи барабанного млина слідує, що стержні каскадом



**Рис. 2. Реалізація способів подрібнення руди при каскадному режимі руху стержнів:**

1 – кусок руди; 2 – стержень;  $F$  – прикладена сила;  $v$  – швидкість руху стержня;  $n$  – швидкість обертання стержня; а – часткове різноспрямоване роздавллювання; б – руйнування ударом; в – подрібнення стиранням; г – вертикальне роздавллювання



рівнобіжними шарами скочуються вниз по криволінійній поверхні, яка розташована під кутом, близьким до кута природного укосу, однак дані кути ніхто не вивчав. У барабанному млині стержні мають різний діаметр і розташовуються у певному порядку за цією ознакою. У окремих траєкторіях руху знаходяться стержні з наближено однаковим діаметром. В залежності від порядку розстановки стержнів за величиною діаметра в зоні каскадного руху спостерігається ряд траєкторій у вигляді нахилених прямих, відповідно яким перекочуються стержні з різними діаметрами у розпушеному стані. Характер руху буде визначатись кутом природного ухилу стержнів. Конкретно дати відповідь на це питання можливо дослідивши кути природного ухилу циліндричних стержнів різних діаметрів. Моделі поперечних перерізів геометричних фігур з стержнів різних діаметрів приведені на рис. 3. З нього спостерігається криволінійність площин, по яким рухаються в каскадному режимі стержні, та кути природного ухилу. З рис. 3 видно, що не залежно від величини діаметрів стержнів в межах 125 мм, 95 мм і 65 мм кут природного ухилу стержнів є незмінним і дорівнює  $60^\circ$ . Тому можливо стверджувати, що траєкторії руху стержнів різних діаметрів в каскадному процесі будуть являти собою нахилені під кутом природного ухилу паралельні прямі.

Механізм «кипіння» або розрихлення стержнів в процесі руху вздовж прямої ділянки траєкторії під кутом  $60^\circ$  показано на рис. 4. З рис. 4 видно, що перший шар стержнів перекочується у відповідності з нанесеними стрілками. Зверху таким же чином рухається другий стержневий шар. Кожен з стержнів в русі провалюється у борозди між стержнями нижнього шару. При цьому відбувається удар і підйом стержня другого шару. Він перебуває вище нормальної траєкторії його руху з наступним опусканням на неї. Після цього цикл повторюється. Таким чином рухаються усі стержні другого шару. Тобто, вони пульсують або «киплять» (розпушуються). Такі ж процеси відбуваються у всіх верхніх рухомих шарах стержнів. При цьому руйнування руди відбувається ударом, роздавлюванням і стиранням. Як видно, стирання руди відбувається зустрічними обертовими рухами стержнів у сусідніх шарах.

Стержні в барабанний млин завантажують обсягом 35–45 % об'єму барабана. Щільність стержневого завантаження в каскадному режимі роботи у будь-яких точках поперечного перерізу однакова. Це пояснюється розташуванням в окремих зонах подрібнення стержнів з наближено

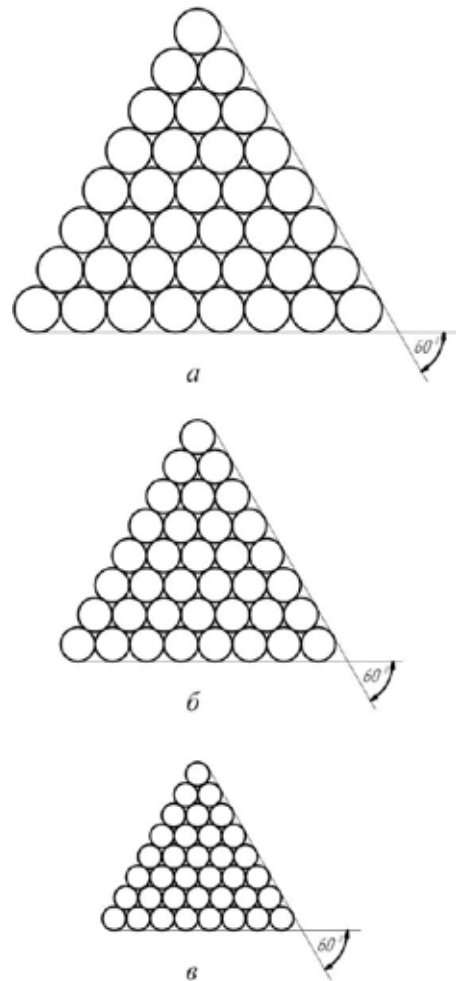


Рис. 3. Моделі поперечних перерізів геометричних фігур з стержнів діаметром 125 мм (а), 90 мм (б) та 65 мм (в)

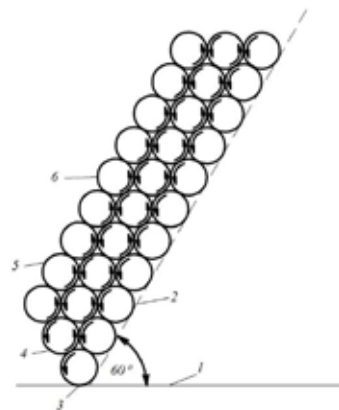
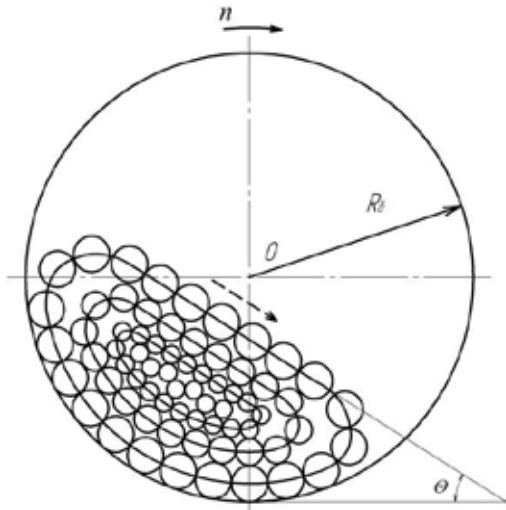


Рис. 4. Механізм «кипіння» або розпушення стержнів в процесі руху вздовж прямої ділянки траєкторії, нахиленої під кутом природного ухилу молотильних тіл:

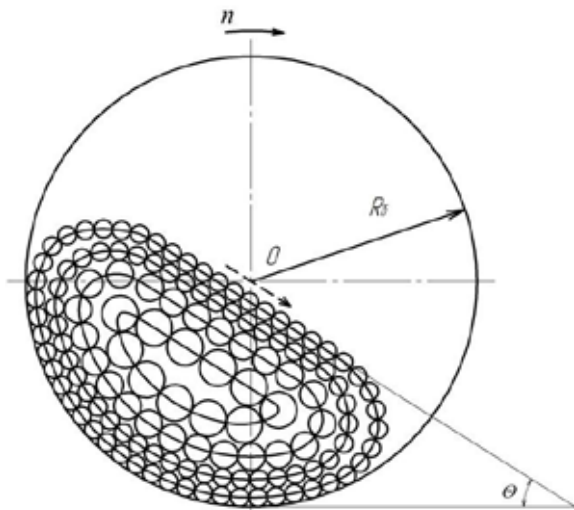
1 – горизонтальна пряма; 2 – уявна лінія природного ухилу однорозмірних стержнів; 3 – перший шар рухомих стержнів; 4 – другий шар рухомих стержнів; 5 – третій шар рухомих стержнів; 6 – стержень;  $60^\circ$  – кут природного ухилу однорозмірних стержнів

однаковим діаметром, де відношення площі повітряних проміжків до площі сталі однакове, або об'єм пустот складає 21,5 %, а об'єм стержневої сталі – 78,5 % [2].

Проблему складає різна зносостійкість молоткового середовища в залежності від його крупності. Така ж ситуація зберігається і щодо закономірнос-



**Рис. 5.** Схема руху стержнів відповідно моделі Д.К. Крюкова у каскадному режимі роботи барабанного млина при обертах, значно менших 0,5 критичного значення:  
 $R_0$  – внутрішній радіус барабана;  $n$  – швидкість обертання барабана;  $\Theta$  – кут, що дещо перевищує кут природного ухилу



**Рис. 6.** Схема руху стержнів відповідно моделі Д.К. Крюкова у каскадному режимі роботи барабанного млина при обертах барабана 0,5–0,6 критичного значення:  
 $R_0$  – внутрішній радіус барабана;  $n$  – швидкість обертання барабана;  $\Theta$  – кут, що дещо перевищує кут природного ухилу

тей розташування стержнів різних діаметрів при каскадному режимі роботи барабанного млина. Найбільш повно висвітлені ці питання в моделі професора Дніпропетровського гірничого інституту Д.К. Крюкова, яка є найбільш повною і затребуваною. Сутність даної моделі опублікована в ряді робіт. З неї слідує, що в усталеному режимі роботи млина кульове завантаження складається з суміші куль різного діаметра. В процесі експлуатації внаслідок особливостей механіки внутрішньомлинового завантаження спостерігається поперечна і поздовжня сегрегація куль за крупністю. При невеликих швидкостях обертання барабана дрібні кулі зосереджуються у середніх частинах його поперечного перерізу. У каскадному режимі роботи дрібні кулі відхиляються до стінок барабана, а крупні накопичуються в центральних зонах. Поздовжня сегрегація полягає в тому, що крупні кулі зосереджуються біля розвантажувального кінця барабана.

Стержневі млини у такому спрямуванні практично не досліджувалися, однак, розглядаючи розташування куль за крупністю і умовно їх об'єднуючи вздовж барабана, приходимо до висновку, що в поперечному перерізі кульове і стержневе завантаження співпадають. Отже, стержневе завантаження за крупністю буде розташовуватись аналогічно кульовому. Це дозволяє досліджувати поведінку стержневого завантаження в каскадному режимі роботи барабанного млина відповідно моделі Д.К. Крюкова, як це показано на рис. 5 і рис. 6.

Виходячи з викладеного, доцільно розглянути обидва варіанта розташування стержнів у барабанному млині, відмічених у моделі Д.К. Крюкова.

Каскадний режим руху барабанного млина дозволяє отримати більш тонке подрібнення руди, оскільки вихідний продукт руйнується в основному шляхом роздушування і розтирання стержнями, які перекочуються. За даними ряду авторів каскадний режим характеризується підвищеним спрацюванням футерівки. Стержні в каскадному режимі спрацьовуються більш інтенсивно порівняно з футерівкою. Відомо, що витрата куль на тону подрібнюваної руди не стійка, оскільки зв'язана з продуктивністю млина, яка залежить від властивостей руди. Більш стійкою є витрата куль, віднесена до одиниці енергії, яка витрачена на подрібнення руди. Витрата стержнів на подрібнення однієї тони руди складає від 0,1 до 1 кг. Дослідним шляхом доведено, що спрацювання куль пропорціональне корисно витраченій енергії. Відповідно виробничим даним, середня витрата

сталевих куль складає 0,091 кг, а витрата стержнів – 0,12 кг на 1 кВт.г корисної енергії. Важливим є вивчення зносостійкості стержнів різних діаметрів, оскільки на це питання конкретної відповіді поки що не існує. Перекласифікацію та довантаження стержневого завантаження здійснюють у відповідності з технологічними інструкціями підприємства. Важливою задачею є підтримання номінального стержневого завантаження в процесі експлуатації.

Необхідно рахуватися зі зносостійкістю стержнів і вздовж барабана млина. Дослідимо це на прикладі однієї з збагачувальних фабрик України, де використовують стержневий млин МСЦ 3,5×5,5, в якому стержні діаметром 100 мм, масою 120 т займають 40 % обсягу барабана. Як показано в роботі [2], при однорозмірному стержневому завантаженні об'єм проміжків між молотковими тілами складає 21,5 %, а об'єм сталі – 78,5 %. Густина пульпи у розвантаженні стержневого млина підтримується на рівні 2,50–2,60 т/м<sup>3</sup>, що відповідає 84–86 % твердого. Стержневий млин на вході отримує з неперервною і незмінною продуктивністю вихідну руду певного технологічного різномірного з практично незмінною середньозваженою крупністю, а на виході розвантажує подрібнений матеріал певної середньозваженої крупності [3]. У виробничих випробуваннях вихідну руду на вході стержневого млина змінювали. Одна з реалізацій таких експериментів за крупністю і твердістю приведена в табл. 1. Рудна продуктивність на вході стержневого млина підтримувалася на рівні 190 т/год. Як видно з табл. 1, при незмінній продуктивності стержневого млина і різних середньозважених крупностях вихідної руди отримані різні кінцеві середньозважені крупності розвантаження, що визначається міцністю руди. Так, при самій вищій середньозваженій крупності руди 10,44 мм у першому випробуванні, отримано найдрібніший продукт у розвантаженні –

0,953 мм. Це відповідає самій легкоподрібнюваній руді родовища. Середня за міцністю руда була у другому випробуванні. У третьому випробуванні була сама міцна руда родовища.

Вихідна руда в стержневому млині при пересуванні вздовж барабана неперервно зменшує свій розмір у відповідності з кінетикою подрібнення. Зміна середньозваженої крупності руди вздовж барабана млина при подрібненні описується рівнянням кінетики [2]:

$$d_{cp} = \frac{d_{cp1}}{\frac{d_{cp1} - d_{cp2}}{d_{cp2}} \cdot \frac{X}{L_6} + 1}, \quad (1)$$

де  $d_{cp1}$ ,  $d_{cp2}$  – відповідно середньозважені крупності руди у завантаженні і розвантаженні млина;  $L_6$  – довжина барабана;  $X$  – координата вздовж осі барабана, яка для млина МСЦ 3,55,5 змінюється від 0 до 5,5 м;  $d_{cp}$  – ордината залежності, середньозважена крупність твердого вздовж осі барабана млина.

Залежності зміни середньозваженого розміру руди вздовж барабана стержневого млина МСЦ 3,5×5,5 відповідно виразу (1) і даним табл. 1 приведені на рис. 7. З рис. 7 видно, що для будь-якої подрібнюваності руди її середньозважена крупність плавно зменшується з найбільшого до найменшого значення. Найбільша крутизна зміни залежності характерна для легкоподрібнюваних руд. Крутизна зміни крупності в процесі подрібнення зменшується по мірі зростання міцності руди. Умовно можливо виокремити три зони інтенсивності подрібнення руди. У самій короткій зоні I довжиною наближено 1 м відбувається інтенсивне руйнування крупної руди. В більш широкій зоні II наближено від 1 до 3 м інтенсивність руйнування твердого відчутна, але значно менша порівняно з зоною I і значно вища, ніж в зоні III. Тобто, це перехідна зона. В III-й зоні руйнування руди

Таблиця 1

Склад продуктів на вході і виході стержневого млина в промислових експериментах, %

| Клас крупності, %, середньозважена крупність $d_{cp}$ , мм | +20  | +15  | +10  | +5   | +3   | +2   | +0,8 | +0,5 | +0,3 | +0,16 | +0,07 | +0,056 | - 0,056 | $d_{cp}$ , мм |
|------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|--------|---------|---------------|
| на вході стержневого млина                                 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |        |         |               |
| Випробування 1                                             | 15,1 | 9,5  | 23,6 | 24,6 | 10,4 | 3,7  | 4,0  | 0,9  | 2,8  | 2,0   | 0,7   | 0,1    | 2,6     | 10,44         |
| Випробування 2                                             | 7,2  | 13,4 | 21,4 | 24,1 | 14,4 | 5,3  | 3,9  | 1,4  | 1,8  | 1,7   | 1,2   | 0,2    | 4,0     | 9,23          |
| Випробування 3                                             | 9,6  | 11,3 | 22,9 | 23,8 | 12,2 | 4,6  | 4,7  | 1,4  | 2,0  | 1,6   | 1,6   | 0,3    | 4,0     | 7,32          |
| на виході стержневого млина                                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |        |         |               |
| Випробування 1                                             | -    | -    | -    | 1,5  | 2,2  | 12,5 | 21,7 | 8,4  | 10,6 | 10,2  | 7,3   | 1,0    | 24,6    | 0,953         |
| Випробування 2                                             | -    | -    | -    | 3,5  | 14,4 | 22,7 | 15,2 | 6,5  | 7,0  | 5,7   | 5,0   | 1,1    | 18,9    | 1,714         |
| Випробування 3                                             | -    | -    | 0,2  | 7,6  | 31,6 | 13,4 | 12,3 | 4,5  | 5,8  | 5,3   | 4,6   | 0,7    | 14,0    | 2,440         |

відбувається практично по лінійній залежності з низькою інтенсивністю і на самій великій відстані для будь-якої руди. Отже, можливо стверджувати, що в зоні I здійснюється подрібнення крупної руди, в зоні II – руди середньої крупності, а в зоні III – дрібної руди.

Розглянемо, як це впливає на спрацювання стержнів вздовж барабана млина на даних приведеного промислового прикладу. Відповідно даним млина МСЦ 3,5×5,5 його стержневого і рудного завантаження, методом застиглого експерименту отримана товщина шару суцільної (не подрібненої) руди на бічній поверхні стержневого молоткового завантаження, яке складає 4,14 мм при усталеній продуктивності 190 т/год.

Умовно перетворимо суцільний шар руди в однорозмірні кульки, враховуючи, що в ньому буде 26 % пустот [4]. Таке перетворення показує, що товщина шару кульового матеріалу на бічній поверхні стержневого молоткового завантаження складе замість 4,14 мм 5,595 мм. Такий розпушений шар подрібненого матеріалу дозволяє оцінити умови подрібнення руди в стержневому млині вздовж барабана. Результати аналізу приве-

дені в табл. 2, де перша колонка в зоні відповідає легкоподрібнюваній руді 1, друга – руді середньої міцності 2, третя – міцній руді 3.

Середнє значення крупності часток руди визначається відповідно кривим рис. 7 в середині конкретної зони подрібнення руди, тобто 0,5 м, 2 м і 4,25 м. Середнє значення кількості шарів визначається як відношення товщини загального шару розпушеного матеріалу до діаметра подрібненого твердого в даній зоні.

З даних табл. 2 видно, що кількість шарів розпушеного матеріалу вздовж барабана зростає.

В процесі подрібнення руди стержні млинів спрацьовуються. Особливо помітні втрати металу при подрібненні міцного абразивного матеріалу. При цьому на поверхні тертя з'являються царапини та ямки різної глибини, форми й орієнтації. Фізико-механічні властивості абразивів обумовлені структурно-текстурними особливостями, віком, генезисом, умовами деформування, наявністю внутрішніх дефектів, неоднорідністю. Існує залежність граничного рівня зростання інтенсивності спрацювання сталей за рахунок зміни твердості абразиву. При порівняно низьких рівнях навантаження, притаманних стержневим

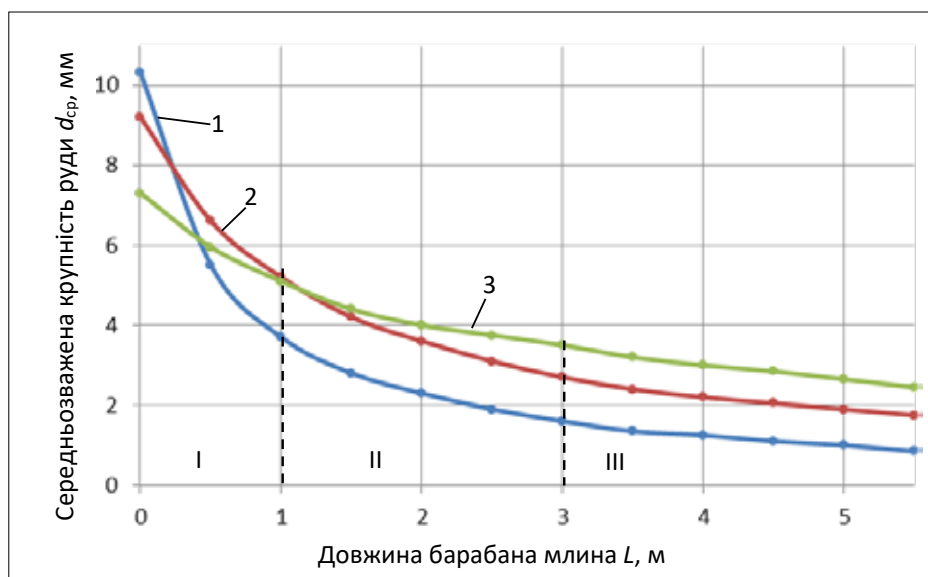


Рис. 7. Залежність середньозваженого розміру руди вздовж барабана стержневого млина МСЦ 3,5×5,5: 1 – легкоподрібнювана руда; 2 – руда середньої міцності; 3 – міцна руда

Таблиця 2

Особливості подрібнення руди вздовж барабана стержневого млина

| Зони подрібнення руди                                                                         | I   |      |      | II   |      |      | III  |      |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Середнє значення середньозваженого розміру часток руди $d_c$ , мм                             | 5,5 | 6,5  | 6,0  | 2,25 | 3,60 | 4,0  | 1,15 | 2,10 | 2,90 |
| Середнє значення кількості шарів матеріалу даної крупності в загальному розпушеному шарі, шт. | 1,0 | 0,86 | 0,93 | 2,50 | 1,55 | 1,40 | 4,86 | 2,66 | 1,93 |

млинам, різниця зносостійкостей різних металів незмінна.

В умовах тертя кочення по абразиву рівень зовнішнього навантаження на частинку визначається багатьма факторами, серед яких основними вважають швидкість кочення стержня по абразиву, його діаметр, товщина шару абразиву, густина частинок в шарі та їх розмір, механічні характеристики матеріалу молоткового тіла. До цього слід віднести і вид абразиву – монолітний чи незакріплений. У стержневому млині частинки абразиву не закріплені. Розташування абразиву на металевій основі також впливає на динаміку взаємодії, рельєф, глибину ямок і спрацювання подрібнюючих тіл, які працюють в конкретних умовах.

Динамічний вплив абразивної частинки при коченні обумовлює прояв часткових особливостей руйнування металу, притаманних удару. Це стосується схильності до в'язкого чи крихкого руйнування, здатності до структурних змін, при деформуванні, змін початкових властивостей та ін.

Спрацювання при коченні по абразиву є різновидом ударно-абразивного спрацювання з усіма особливостями, притаманними зносу при ударі.

При подрібненні руди в стержневому млині на робочі поверхні неперервно надходять нові частинки вихідної руди. Відомо, що не закріплені на металевій основі частинки при ударі по ним стержня дробляться на більш дрібні, які мають меншу спрацьовуючу здатність порівняно з вихідними, більшими за розміром.

Одношарове розташування абразиву характеризується тим, що частинки абразиву знаходяться між двома металевими поверхнями – основи і стержня, твердість яких менше твердості абразиву. В момент удару окремі частинки укорінюються безпосередньо в основу і стержень. При цьому відбувається активне ураження поверхонь обох складових процесу.

Якщо абразив розташовується в кілька шарів з певними розмірами частинок, то інтенсивність спрацювання зменшується, оскільки удар пом'якшується з двох сторін. При незмінності інших факторів максимальне спрацювання відбувається при ударі стержня по шару абразиву, товщина якого сумірна з одиничною частинкою.

Отже, найбільше спрацювання стержнів при подрібненні руди буде при одношаровому розташуванні часток руди, а найменше – при багатошаровому. Цілком можливо допустити, що чим товщий шар руди, тим руйнування буде меншим.

З даних табл. 2 слідує, що в зоні подрібнення І створюються практично однакові ситуації з одно-

шаровим подрібненням, де спрацювання стержнів буде максимальним. У зоні подрібнення II спрацювання є дещо меншим. Найбільшим воно буде при найміцнішій руді. В зоні подрібнення III спрацювання буде набагато меншим навіть порівняно з перехідною зоною II, оскільки в зоні III вже відбувається багатошарове подрібнення з кількістю шарів практично від 2 до 5. Практично можливо зробити висновок, що при незмінній продуктивності млина легкоподрібнювана руда забезпечує найменше спрацювання стержнів, руда середньої міцності – середнє, а міцна руда – саме велике, забезпечуючи при цьому найбільшу крупність твердого в розвантаженні. З розглянутого видно, що стержні в процесі подрібнення руди з циліндричних перетворюються в конічні і з цим необхідно рахуватись.

**Висновки.** Таким чином, з розглянутого видно, що рух стержнів при роботі барабанного млина в каскадному режимі системно практично не досліджувався. Приведені основні параметри, характеристики і особливості стержневих барабанних млинів. Розглянуті реалізації способів подрібнення руди при каскадному режимі руху стержнів. Отримані моделі поперечних перерізів геометричних фігур з стержнів різних діаметрів, на базі яких встановлені кути природного ухилу стержнів. Вони не залежать від діаметра стержнів і дорівнюють для однорозмірних молоткових тіл  $60^\circ$ . Встановлено механізм розпушування стержнів в процесі руху вздовж прямої ділянки траєкторії, нахиленої під кутом, близьким до кута природного ухилу молоткових тіл. Розглянуті схеми руху стержнів відповідно моделі Д.К. Крюкова у каскадному режимі з номінальними для нього заниженими швидкостями обертання барабана. Виконано виробничі дослідження роботи стержневих млинів на трьох характерних за міцністю технологічних різнотипах руд з незмінною продуктивністю технологічного агрегату 190 т/год і різною середньозваженою крупністю руд, розглянута кінетика подрібнення такого матеріалу. Продемонстровано, що умовно можливо виокремити три зони інтенсивності подрібнення руди. Встановлено, що в першій зоні подрібнюється сама крупна руда, в другій – середня, а в третій сама дрібна. Показано, що в першій зоні відбувається одношарове подрібнення руди, у другій – в півтора-два з половиною шара, а в третій зоні двох-п'ятишарове подрібнення. Це впливає на інтенсивність подрібнення. Тому в процесі експлуатації циліндричні стержні перетворюються в конічні і з цим необхідно рахуватися. Мета дослідження досягнена.

**Список літератури:**

1. Підготовка корисних копалин до збагачення : монографія / М.І. Сокур та ін. Кременчук : ПП Щербатих О.В., 2017. 392 с. ISBN 978-617-639-139-5.
2. Кондратець В.О., Мацуй А.М., Сербул О.М. Математичне моделювання базових параметрів стерженового завантаження циліндричних млинів як керованих об'єктів. *Математичне моделювання*. 2023. № 2 (49). С. 76–85.
3. Кондратець В.О., Мацуй А.М., Сербул О.М. Удосконалення рудного живлення кульових млинів щодо ліквідації збурюючих впливів при подрібненні сировини : монографія. Кропивницький : Видавництво «КОД», 2024. 216 с. ISBN 978-617-653-089-3.
4. Кондратець В.О., Мацуй А.М. Сферична частинка твердого певного розміру як основа процесу моделювання розпушення гірських порід. *Математичне моделювання*. 2016. № 2 (33). С. 55–59.

**Kondratets V.O., Serbul O.M., Matsui A.M., Yarmolenko V.V. MATHEMATICAL MODELING OF THE ROD GRINDING LOAD OF A TUMBLING MILL IN THE CASCADE MODE OF ORE GRINDING**

*It has been established that the movement of rods during the operation of a tumbling mill in a cascade mode has not been studied systematically. The main parameters, characteristics and features of rod mills are presented. The modeling was carried out within the framework of the development of the topic “Optimization of the productivity of rod mills of the open cycle for ore and finished product with minimal energy and material overruns”, which is part of the scientific theme of the Central Ukrainian National Technical University. The topic of the article is relevant. The aim of the work is to mathematically model the rod grinding load of a tumbling mill in the cascade mode of ore grinding with the establishment of the location of the rods in cross-section, the regularities of their movement, the angles of natural slope, and the features of wear along the drum. The methods used were analysis, comparison, mathematical modelling, the theory of ore grinding in ball and rod mills, methods of the theory of metal body wear in interaction with a loose abrasive, and methods of ore grinding kinetics. The basis was a rod mill MSC-35-55, which is used at large-scale iron ore processing plants. This mill is most commonly used in cascade mode. For this and a similar mode of drum rotation, the arrangement of rods of optimal loading of three diameters of different sizes is considered. Implementations of methods of ore destruction during the cascade movement of the rods are considered. The models of cross-sections of geometric shapes made of rods of three diameters were obtained, which made it possible to determine the angles of their natural slope. The angles of natural slope of rods of the same diameter are equal to  $60^\circ$  and do not depend on this parameter. The mechanism of rod loosening in the process of moving along a straight section of the trajectory inclined at an angle close to the angle of natural grinding media slope was established. Production studies of rod mills have been carried out for grinding three ore types with different strength characteristics, different weighted average size and a constant ore productivity of 190 t/h. The kinetics of grinding of such material is considered. Three zones of ore grinding intensity were identified. In the first zone, the coarsest ore is crushed, in the second – medium, and in the third – the finest. In the first zone, the ore is crushed in a single layer, in the second – in one and a half to two and a half layers, and in the third zone, two to five layers are crushed. It has been shown that single-layer grinding will result in the most efficient destruction of ore pieces and the highest wear of the rods due to the greater forces applied by the rod at a specific point of interaction with the abrasive. If there is more than one layer of abrasive between the rod and the metal base when it rolls, the grinding effect and grinding media wear is reduced. These effects will be even less pronounced if there are a large number of abrasive layers. Therefore, in the process of grinding ore, cylindrical rods are converted into conical ones and this must be taken into account. The research objective has been achieved.*

**Key words:** rod grinding load, cascade mode, modeling, natural slope angle, loosening, taper of rods.

**Кропивницька В.Б.**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

**Кропивницький В.Р.**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

## РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МОНІТОРИНГУ ТА АНАЛІЗУ ДАНИХ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ІНТЕРНЕТ З'ЄДНАННЯ

*Незважаючи на розвиток нових технологій, тести швидкості залишаються мало змінними, що створює розрив між очікуваннями користувачів та реальною якістю мережі, чим і пояснюється актуальність розробки програмного забезпечення, яке відповідає потребам користувача, дозволяє оцінити показники якості мережі Інтернет з врахуванням зростання трафіку та національних стандартів України ДСТУ ETSI EG 202057-4:2021 та COV 61-34620942-011:2012. Здійснено аналіз ключових параметрів, таких як швидкість завантаження та вивантаження даних, затримка, втрата пакетів та стабільність з'єднання, що дозволяє користувачам отримувати точну інформацію про стан мережі. Це допомагає оперативно виявляти та усувати проблеми, забезпечуючи надійний і швидкий доступ до Інтернету.*

*Програмне забезпечення реалізовано на платформі .NET з використанням бібліотеки React і бази даних на клієнт-серверній архітектурі. Записи про звернення клієнтів стосовно перевірки якості Інтернет-зв'язку зберігаються в реляційній базі даних, з використанням декларативної мови SQL і системи управління базою даних PgAdmin 4. У даній статті представлені дві блок-схеми, які описують алгоритми виконання головних функцій у програмі для тестування якості Інтернет-зв'язку. Описано клієнт-серверну архітектуру проекту, що складається з двох частин: API, розміщеного на віддаленому сервері, який містить методи для взаємодії з клієнтською частиною програми, та інтерфейсу клієнта, який встановлюється на комп'ютері-клієнті та містить сторінки для налаштування, тестування та перегляду звітів. Продемонстровано можливості розробленого додатку на прикладі проведеної сесії тестування, яка складалась з 6 сеансів. Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, можливість формувати звіти різних типів та висока надійність розробленого програмного забезпечення робить його корисним як для звичайних користувачів, так і для провайдерів Інтернет-послуг.*

**Ключові слова:** Інтернет з'єднання, програмне забезпечення, база даних, швидкість передавання даних, показники якості, тестування.

**Постановка проблеми.** Війна підкреслила надзвичайну важливість збереження доступу до мережі Інтернет. Це дозволяє людям отримувати свіжі новини, зв'язуватися з близькими та переконатися, що вони в безпеці. Крім того, багато професій не вимагають особистої присутності, поширеним є можливість роботи на віддаленому доступі. Тому наявність якісного зв'язку в мережі Інтернет сьогодні має важливе значення. Для оцінки загальної якості зв'язку Інтернету і визначення того, наскільки ефективно працює мережа важливими є такі параметри: швидкість передачі даних, затримка або латентність, втрата пакетів, стабільність з'єднання, пропускна здатність [1; 2].

Основною характеристикою підключення до глобальної мережі є швидкість інтернет-з'єднання. Від неї залежить, який обсяг інфор-

мації за одиницю часу абонент отримує на свій пристрій. Оскільки, користувач не тільки завантажує інформацію з Інтернету, а й вивантажує її в мережу, тому швидкість інтернету поділяється на дві підхарактеристики [3]: швидкість завантаження – характеристика, що означає, з якою швидкістю абонент отримує інформацію та швидкість передачі – пропускна здатність вихідного трафіку. Зазвичай значення обох цих характеристик різне: швидкість завантаження вище швидкості передачі даних.

На якість зв'язку та швидкість передачі даних впливає таке негативне явище як втрата пакетів. Причиною цього може бути перевантаження мережі, переповнення буферів або проблеми на маршруті, такі як несправне обладнання, переривання ліній зв'язку або інші технічні проблеми.

Втрата пакетів може призвести до необхідності повторної передачі деяких даних, що зменшує швидкість з'єднання та призводить до збільшення затримок при передачі даних.

Такий показник як стабільність з'єднання може бути визначений за допомогою різних параметрів, які включають втрату пакетів, швидкість передачі даних та час відповіді мережі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Загалом, тестування швидкості інтернету є важливим інструментом для забезпечення надійного та швидкого доступу до інтернету, як для індивідуальних користувачів, так і для бізнесу. На сьогоднішній день існує багато програм, які дозволяють оцінити швидкість та інші параметри Інтернет з'єднання. Проте тести швидкості майже не змінилися за останні два десятиліття, незважаючи на те, що з'явилися нові технології доступу підключення до Інтернету [4]. Зі збільшенням кількості людей, які користуються Інтернетом, зростає розрив між тестами швидкості та досвідом користувача щодо оцінки якості мережі. Як правило, кінцевий користувач оцінює ефективність функціонування мережі, враховуючи її пропускну здатність, проте ця характеристика є необхідною, але не достатньою. У багатьох випадках, користувачу потрібна «краща пропускну здатність», яка мінімізує затримку, втрату пакетів і т. д. [5].

В роботі [6] визначено вагомість показників за трьома рівнями та важливість їх експертної оцінки для визначення якості надання телекомунікаційних послуг, щоб вчасно усунути виявлені недоліки, основними з яких є: показники якості доступу до мережі передачі даних загального користування; показники якості послуг із передачі даних і доступу до Інтернету; показники якості обслуговування споживачів.

Різні державні, комерційні організації та звичайні користувачі використовують такі популярні методи вимірювання швидкості передачі даних як використання спеціальних утиліт, які дозволяють відправити тестові пакети даних між вузлами та виміряти час, необхідний для їх доставки [7] та на так звані тести швидкості Інтернету для вимірювання швидкості широкопasmового Інтернету [8, с. 72]. Прикладами таких програм є Fusion Connect Speed Test Plus, проводить перевірку мережі, завантажуючи та відвантажуючи дані з сервера на комп'ютер протягом 10 секунд; Cloudflare Speed Test – Застосунок, який дозволяє провести декілька сеансів тестування та визначити такі характеристики як: затримка реєстрації; затримка під час завантаження та відвантаження, тремтіння сигналу, коефіцієнт втрати пакетів та формує звіт у вигляді графіків; Fast.com – застосунок, що обчислює тільки такі показники як швидкість передавання даних та затримку та має обмеження за часом.

Розглянуті веб-застосунки мають деякий спільний функціонал, всі розглянуті системи дозволяють виміряти швидкість передавання даних та затримку. Проте дані системи мають ряд недоліків, так як вони не мають можливості вибрати сервер, не можна вибрати кількість потоків, не має можливості обрати тип інтерфейсу, у деяких відсутня можливість формування звітів у вигляді графіків чи файлів заданого формату. В таблиці 1 подано порівняльний аналіз деяких он-лайн сервісів вимірювання якості Інтернет зв'язку.

Отже, більшість тестів швидкості пропонують лише веб-інтерфейс, який вибирає сервер для тестування за замовчуванням, що ускладнює автоматичне виконання тестів з налаштуванням користувача. Крім того, незважаючи на додаткове навантаження, яке створюють різні рівні

Таблиця 1

**Порівняльний аналіз програм тестування якості Інтернет з'єднання**

| Показник                           | Fusion Connect Speed Test Plus | Cloudflare Speed Test | Fast.com | Розроблюване ПЗ |
|------------------------------------|--------------------------------|-----------------------|----------|-----------------|
| Наявність стартової сторінки       | -                              | +                     | -        | +               |
| Можливість вибору сервера          | +                              | -                     | -        | +               |
| Обмеження часу/кількості тестувань | -                              | +                     | +        | -               |
| Декілька паралельних потоків       | +                              | +                     | +        | +               |
| Можливість налаштувань користувача | -                              | +                     | -        | +               |
| Вимірювання швидкості з'єднання    | +                              | +                     | +        | +               |
| Вимірювання затримки               | +                              | +                     | +        | +               |
| Відсоток відмов                    | +                              | +                     | -        | +               |
| Тремтіння сигналу (джиттер)        | +                              | +                     | -        | +               |
| Відсоток втрачених пакетів         | +                              | -                     | -        | +               |
| Графічне представлення результатів | -                              | +                     | -        | +               |



(наприклад, сам браузер) та динаміка навколишнього середовища (наприклад, мережеві затори), ці платформи відображають лише кілька простих метрик (наприклад, пропускна здатність завантаження/вивантаження) [9, с. 1]. Тому, без даних, що надають необхідний контекст, діагностувати першопричини погіршення продуктивності дуже складно.

Для вирішення цієї проблеми доцільно розробити програмне забезпечення, яке буде відповідати потребам користувача в мережі та вирішуватиме конкретні проблеми під час мережевого тестування, що реалізує спеціалізовану діагностику притаманну конкретному клієнту.

**Постановка завдання.** Метою роботи є розроблення програмного забезпечення, функціонал якого дозволить реалізувати автоматичне виконання, можливість індивідуального налаштування та глибокий аналіз веб-базованих тестів швидкості, формувати звіти в заданому форматі та зберігати дані тестування в архіві.

**Виклад основного матеріалу.** Перш за все, розроблене програмне забезпечення повинно відповідати таким цілям: забезпечення єдиного зручного інтерфейсу з можливістю його конфігурування під потреби користувача для виконання відтворюваних тестів на різних платформах, легке та детальне захоплення даних тесту з різних рівнів, проведення міжрівневого аналізу для надання всебічного огляду та збереження результатів тестів якості Інтернет зв'язку [9].

Для визначення показників та параметрів якості послуг із передачі даних і доступу до Інтернету було застосовано модель, яка має чотири рівні, що визначають основні критерії якості взаємодії кінцевого обладнання з мережею [10, с. 8]. Для оцінки якісних показників з'єднання в мережі Інтернет використовуються кількісні величини, які отримують шляхом моніторингу мережі, зокрема, фіксують загальну кількість звернень до окремої послуги та кількість успішних звернень. На основі методу статистичних випробувань та теорії ймовірності обчислюють потрібні параметри якості зв'язку згідно стандартів СОУ 61-34620942-011:2012 [10] і ДСТУ ETSI EG 202057-4:2021 [11].

Програмний додаток створено на платформі .NET з використанням бібліотеки React. Всі звернення клієнтів щодо перевірки якості Інтернет-зв'язку записуються і зберігаються в базі даних, що базується на клієнт-серверній архітектурі. У проекті використовується реляційна база даних, а для взаємодії з нею використовується декла-

ративна мова SQL і система управління базою даних – PgAdmin 4.

В базі даних повинні зберігатись дані, які користирувач має можливість записати сам, деякі дані формуються після того як буде створено запит до бази даних, а частина даних (параметри оцінки якості з'єднання мережі Інтернет) обчислюють за методикою, визначеною стандартом України [10] і записуються в базу даних для формування звітів. Тому, доцільно використати декілька таблиць:

- таблиця Engineer містить дані про фахівців, тобто співробітників, під акаунтом яких можуть проводити тестування користувачі;

- таблиця Provider містить дані про постачальників послуг, які надають доступ до Інтернету;

- таблиці Engineer і Provider використовуються при формуванні звітів;

- таблиця Server містить дані про віддалений сервер. Це одна з головних таблиць, в якій міститься інформація про сервер, що приймає дані і відправляє відповідь під час тестування;

- таблиця Session містить дані про один сеанс тестування;

- таблиця Ping містить дані про затримку між запитом та відповіддю;

- таблиця TestResult містить дані про одну сесію тестування, а саме швидкість завантаження/вивантаження даних, значення затримки, час реєстрації, час завантаження/відвантаження, коефіцієнт помилок, кількість втрачених пакетів та ін.

На основі розроблених таблиць було сформовано структуру бази даних (рис. 1), яка складається з 6 таблиць, пов'язаних зв'язками один до багатьох.

Згідно поставлених задач і цілей, програмне забезпечення повинне забезпечувати користувачу такі функціональні можливості:

1. Змінювати значення стандартів, яким має відповідати мережа.

2. Зберігати дані про різні сервери для проведення тестування.

3. Зберігати дані про різних фахівців, від імені яких буде проводитися тестування.

4. Обчислювати значення таких показників:

- відсоток успішних входжень у систему;

- час 80 % серед найшвидших входжень в систему;

- час 95 % серед найшвидших входжень в систему;

- максимальне значення швидкості завантаження;

- мінімальне значення швидкості завантаження;

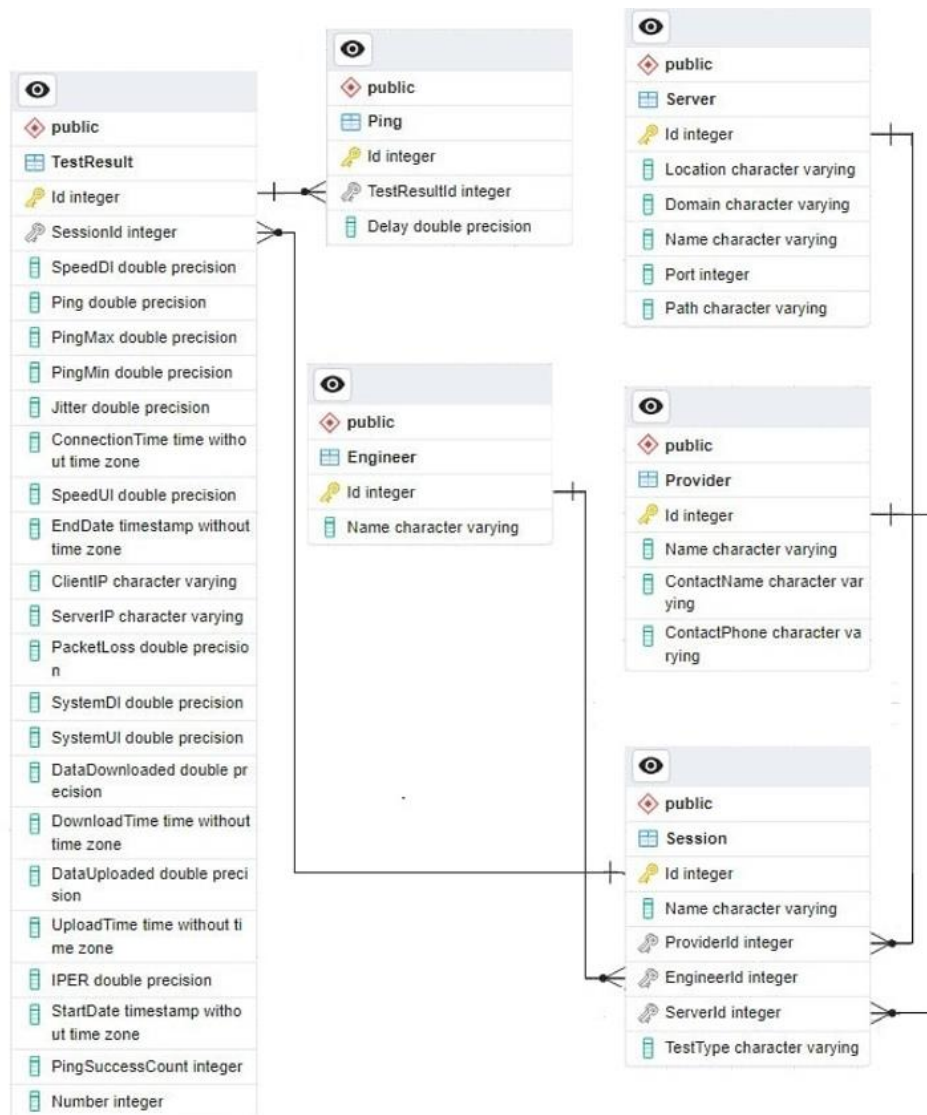


Рис. 1. Структура бази даних

- середнє значення швидкості завантаження;
- стандартний відхил швидкості завантаження;
- максимальнє значення швидкості вивантаження;
- мінімальнє значення швидкості вивантаження;
- середнє значення швидкості вивантаження;
- стандартний відхил швидкості вивантаження;
- середнє значення затримки;
- стандартнє відхилення затримки;
- відсоток відмов;
- відсоток реєстрації які відповідають нормам за часом реєстрації;
- відсоток незадовільних з'єднань за швидкістю передавання вивантажених даних;

- відсоток незадовільних з'єднань за швидкістю передавання завантажених даних;
- тремтіння сигналу;
- відсоток втрачених пакетів;
- відсоток помилок у пакетах.

5. Відобразити отримані результати тестування у вигляді графіків та звітів.

Для реалізації клієнтської частини було застосовано бібліотеку React. Для реалізації тестування були використані бібліотеки Stopwatch (в якості таймеру), httpClient (в якості механізму для тестування) та SignalR для можливості спостерігати за виконанням тестування у реальному часі. Зв'язок з базою даних встановлений за допомогою ODBC драйверу.

Всього, у проєкті реалізовано 3 алгоритми для збору інформації про мережу:

- визначення затримки, тремтіння сигналу, відсотку втрати пакетів, коефіцієнту помилок у пакетах (Ping);
- визначення швидкості завантаження даних (DownLoadTest);
- визначення швидкості вивантаження даних (UpLoadTest).

Серед них, два головних алгоритма, які збирають ключову інформацію, це є UpLoadTest та DownLoadTest. Оскільки вони доволі схожі по своїй структурі, розглянемо реалізацію алгоритму визначення швидкості вивантаження даних UpLoadTest (рис. 2).

Блок-схема (рис. 3) описує алгоритм виконання головної функції, яка викликається на початку тестування. Спочатку з файлу зчитуються дані про налаштування процесу тестування. Наступний крок – перевірка типу тестування, залежно від якого вибираємо різні класи, що реалізують один інтерфейс. Далі відбувається ініціалізація змінної класу, який містить функціонал для проведення тестування. Потім викликається функція проведення тестування після чого повертається результат.

Блок-схема (рис. 3), описує роботу алгоритму функції Start, яка викликається головною функцією та, безпосередньо, реалізує алгоритм тестування відвантаження даних з комп'ютера-клієнта на комп'ютер-сервер. Спочатку ініціалізується змінна класу Stopwatch, за допомогою якої проводиться відлік часу, протягом якого відбувається тестування. Після цього зчитуються дані про інтерфейс мережі, через який буде проводитися тестування. Далі розпочинається цикл, по кількості паралельних потоків, вибраних користувачем. У середині циклу, заповнюється список завдань (Task) тестування. Тобто на кожен потік створюється один сеанс тестування. Після закінчення циклу розпочинається відлік часу за допомогою функції Stopwatch() та розпочинається виконання усіх завдань (Task). Після відпрацювання усіх завдань тестування, відлік припиняється та функція повертає результат.

Проект має клієнт-серверну архітектуру та складається з двох частин.

1. API, що представляє собою програму, розміщену на віддаленому сервері, який у свою чергу виконує, роль комп'ютера, з яким буде утворений зв'язок для оцінки якості з'єднання. API містить всього три методи для взаємодії: Upload(), Download(int time) і DownloadFile(long fileSize).

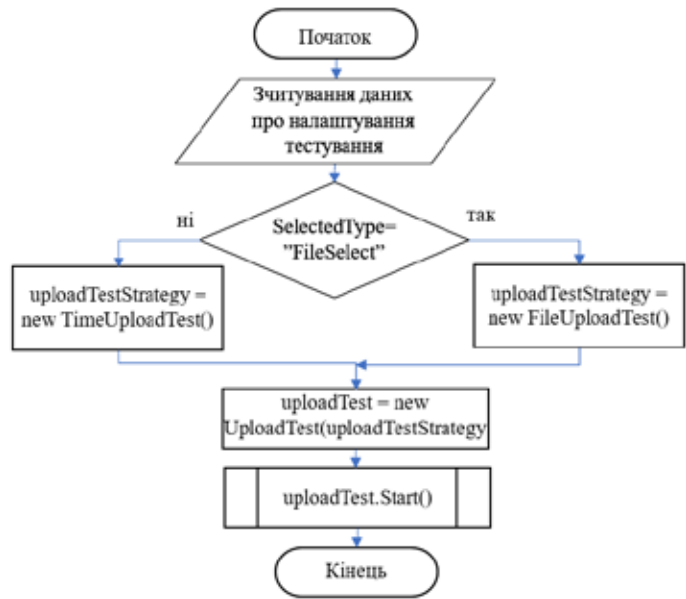


Рис. 2. Блок-схема функції UpLoadTest

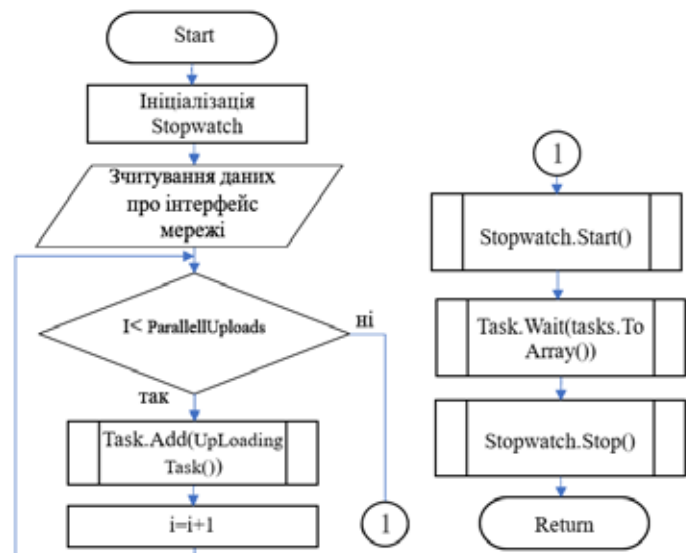


Рис. 3. Блок-схема функції Start

Метод Upload() викликається під час тестування відвантаження даних з комп'ютера-клієнта до віддаленого серверу. Метод Download() викликається під час тестування завантаження даних з віддаленого серверу до комп'ютера-клієнта. Параметр time відповідає за обмеження часу, протягом якого повинно відбуватися завантаження. Метод DownloadFile() викликається під час тестування завантаження цілого файлу з віддаленого серверу до комп'ютера-клієнта. Параметр fileSize відповідає за розмір файлу.

2. Інтерфейс клієнта, що представляє собою програму, яка встановлюється та розгортається на комп'ютері-клієнті у вигляді локального сайту.

Клієнтська частина (локальний сайт) містить три сторінки: «Налаштування», «Тест» і «Звіти».

Сторінка «Налаштування» дає можливість користувачеві налаштувати програму під свої потреби. Вона складається з шести вкладок: звіти, налаштування програми, встановлені рівні, сервери, постачальник послуг, фахівці (рис. 4). Вкладка «Налаштування програми» дозволяє користувачеві налаштувати тестування під свої потреби, вибрати тип тестування та виставити критерії, за яким оцінюють характеристики зв'язку.

Вкладка «Встановлені рівні» дозволяє встановити значення критеріїв, яким повинна задовольняти мережа відповідно до стандартів [5; 6].

У вкладці «Сервери» користувач вказує IP адресу сервера для проведення тестування, фізичне розташування (не обов'язково), шлях до ресурсу (не обов'язково) та порт для встановлення зв'язку.

На сторінці «Тест» відображається процес тестування якості Інтернет зв'язку між комп'ютером-

клієнтом та віддаленим сервером у режимі реального часу (рис. 5).

На рисунку 5 показано вікно, яке відображається при завершенні тестування. Показано, що було здійснено 1 сесію тестувань, в якій було 6 сеансів, кожен сеанс відбувався через проміжок часу в межах 30–40 с. Інформація відображається і в текстовому вигляді, і у вигляді графіків, що дає можливість візуально сприймати інформацію про швидкість завантажених та відвантажених даних, і порівняти дані показники.

Вкладка «Звіти» дозволяє користувачеві вибрати показники тестувань інтернет-зв'язку для відображення у звітах. Для цього передбачено два способи. Перший спосіб дозволяє переглянути інформацію про показники та параметри оцінки якості зв'язку в мережі Інтернет безпосередньо на сайті, другий спосіб передбачає можливість завантаження звіту та його збереження у файлі формату EXEL (рис. 6).

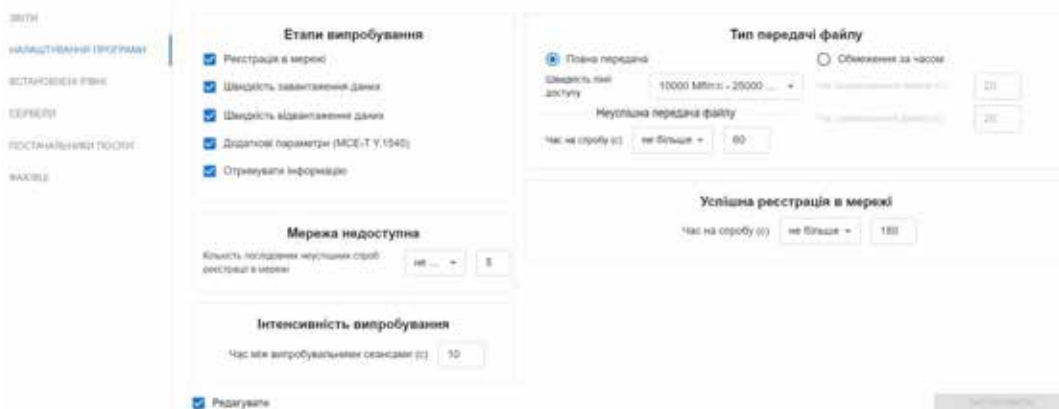


Рис. 4. Вкладка «Налаштування програми» сторінки «Налаштування»



Рис. 5. Закінчене тестування

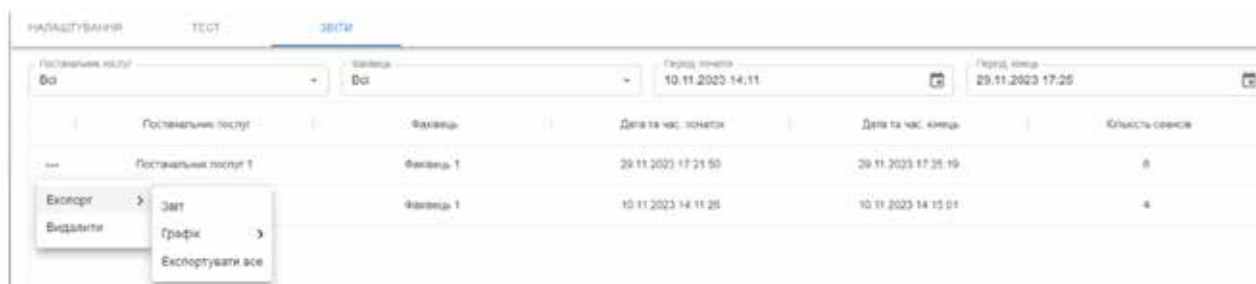


Рис. 6. Сторінка «Звіти»

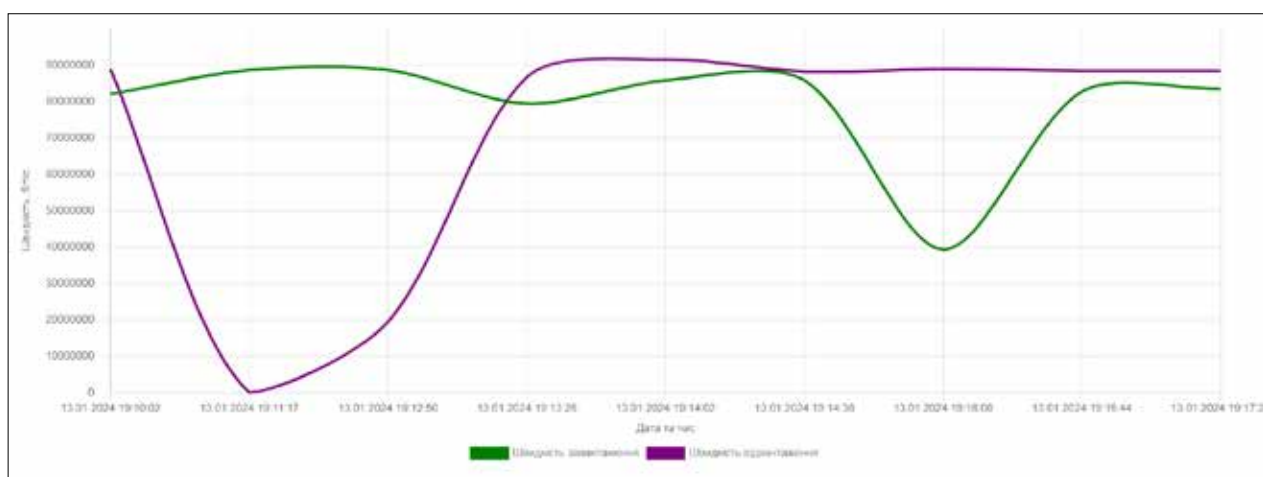


Рис. 7. Графік швидкості передавання даних

Звіт складається з трьох компонентів: загальний звіт, детальний звіт та графіки. Детальний звіт відображає лиш сирі дані, загальний звіт, обчислює відповідність зв'язку стандартам, встановленим на сторінці налаштування.

Також для більш точної оцінки якості з'єднання в мережі, програма здійснює обчислення основних параметрів якості Інтернет-зв'язку та відображає результат обчислень у графічному вигляді (рис. 7).

На даному рисунку зображені значення швидкості передавання даних протягом усього процесу тестування.

**Висновки.** У статті було виконано аналіз трьох популярних он-лайн сервісів вимірювання показників якості Інтернет з'єднання, на основі якого було визначено основні компоненти та функціонал програмного забезпечення для моніторингу та аналізу оцінки якості Інтернет зв'язку.

Було розроблено програмне забезпечення, що має клієнт-серверну архітектуру, продемонстровано можливості та зручність розробленого додатку, враховано, що вимірювання та оцінювання показників якості Інтернет зв'язку

відповідають методикам, затвердженим національними стандартами України ДСТУ ETSI EG 202057-4:2021 та СОУ 61-34620942-011:2012.

На основі зібраної інформації було визначено основні компоненти та функціонал розробленого додатку, що складається з кількох ключових компонентів, кожен з яких вирішує конкретні аспекти процесу тестування швидкості та інших показників:

1. Користувацький інтерфейс – надає зручний, уніфікований та конфігурований інтерфейс для виконання тестів на різних пристроях.

2. Модуль збору даних – дозволяє організувати збір даних і в фоновому, і в інтерактивних режимах роботи додатку з заданим кроком дискретизації.

3. Модуль аналізу та обробки даних – проводить крос-шаровий аналіз зібраних даних за методиками, визначеними національними стандартами України та інтегрує набір інструментів для автоматизації тестів оцінювання якості Інтернет з'єднання за заданими показниками.

4. Модуль формування звітів у зручному для користувача форматі.

**Список літератури:**

1. David Tuber. Measuring network quality to better understand the end-user experience. <https://blog.cloudflare.com/aim-database-for-internet-quality> (дата звернення 12.10.2023).
2. Показники якості послуг із передачі даних, доступу до Інтернету та їх рівні. *Офіційний сайт Верховної Ради України*. веб-сайт. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0135-13#n13> (дата звернення 5.05.2023).
3. Як вибрати задовільну швидкість інтернету. веб-сайт. URL: <https://www.infomir.com.ua/news/yak-vybraty-shvydkist-internetu/>
4. Типи і види інтернет з'єднання. <https://ipkey.com.ua/uk/faq/1092-internet-connection-types.html> (дата звернення 26.04.2023).
5. IAB Workshop Report: Measuring Network Quality for End-Users. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/rfc9318/> (дата звернення:18.06.2023)
6. Капелюшна Т. В., Дименко Р. А. ЕКСПЕРТНА ОЦІНКА ЯКОСТІ НАДАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ПОСЛУГ. *Ефективна економіка* : електронне наукове фахове видання, 2021. DOI: 10.32702/2307-2105-2021.8.94
7. Як перевірити швидкість з'єднання між вузлами мережі: інструкція та інструменти. веб-сайт. URL: <https://nadiia.home.cx.ua/ukraincyam/yak-pereviriti-shvydkist-z-39-iednannya-mizh-vuzlami-merezhi-instrukciya-ta-instrumenti.html> (дата звернення 05.02.2024).
8. Nick Feamster, Jason Livingood. Measuring internet speed: current challenges and future recommendations. *Communications of the acm*. December 2020. Vol. 63. № 12. P. 72–80.
9. Ang, Rui & Mok, Ricky & Wu, Shuohan & Luo, Xiapu & Zou, Hongyu & Li, Weichao. (2022). Design and Implementation of Web-Based Speed Test Analysis Tool Kit. 10.1007/978-3-030-98785-5\_4. P. 1–14.
10. СОУ 61–34620942–011:2012 «Телекомунікаційні мережі передачі даних загального користування. Телекомунікаційні послуги. Основні показники якості. Методи випробування». Київ, 2012. 45 с. (Адміністрація Державної служби спеціального зв'язку та захисту інформації України).
11. Про прийняття та скасування національних стандартів. *Офіційний сайт Верховної Ради України*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0522774-21#Text> (дата звернення 15.10.2023).

**Kropyvnytska V.B., Kropyvnytskyi V.R. DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR MONITORING AND ANALYZING DATA TO EVALUATE INTERNET CONNECTION QUALITY**

*Despite the development of new technologies, speed tests remain unchanged, which creates a gap between user expectations and the real quality of the network, which explains the urgency of developing software that meets the needs of the user, allows to evaluate the quality indicators of the Internet, taking into account the growth of traffic and national standards of Ukraine DSTU ETSI EG 202057-4:2021 and SOU 61-34620942-011:2012. Key parameters has been analyzed such as upload and download speed, latency, packet loss, and connection stability, allowing users to get accurate information about the state of the network. This helps to quickly detect and fix problems, ensuring reliable and fast Internet access.*

*The software is implemented on the .NET platform using the React library and a database on a client-server architecture. Records of customer request related to checking the quality of Internet communication are stored in a relational database, using the SQL declarative language and the PgAdmin 4 database management system. This article presents two flowcharts that describe the algorithms for performing the main functions in the testing Internet connection quality. The client-server architecture of the project consists of two parts: an API that is located on a remote server, and contains methods for interacting with the client part of the application, and a client interface, which is installed on the client computer and contains pages for configuration, testing and viewing reports. The capabilities of the developed application are demonstrated on the example of the conducted testing session, which consisted of 9 sessions. An intuitive interface, the ability to generate various types of reports and high reliability of the developed software make it useful both for ordinary users and for Internet service providers.*

**Key words:** Internet connection, software, database, data transfer rate, quality indicators, testing.

**Кучеренко О.І.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

**Вакалюк Т.А.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

## КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ ТА АЛГОРИТМІВ ПОБУДОВИ МАРШРУТІВ БПЛА

Динамічний характер БПЛА, завдяки їх високій мобільності, дозволяє коригування траєкторії руху в реальному часі для адаптації до різних умов навколишнього середовища. Розповсюдженою задачею планування траєкторії руху БПЛА є політ від заданої початкової точки до кінцевої точки у просторі з перешкодами. Перешкоди зазвичай не закріплені в одному місці, а змінюються в часі та їх важко точно змодельовати, що вимагає корекції траєкторії під час польоту. Планування таких траєкторій може вимагати складних обчислень, які займатимуть велику кількість часу, що не є допустимим для БПЛА з міркувань як безпеки, так і енергоефективності. Тому інженери повинні поставитись відповідально до вибору застосованого алгоритму побудови маршруту руху БПЛА. Отже, класифікація та узагальнення алгоритмів побудови маршрутів руху БПЛА стають необхідними.

В роботі представлено класифікацію методів та алгоритмів побудови маршрутів руху БПЛА за п'ятьма критеріями: відповідно до умов руху БПЛА, за типами задач, за алгоритмічним рівнем, за функціональним рівнем та методом планування шляху. Підсумовуючи все разом, розглянуто наступні групи алгоритмів та методів: планування руху у безперервних просторах, у просторі з урахуванням диференціальних обмежень та в умовах невизначеності; традиційні, інтелектуальні та гібридні алгоритми; планування на основі часу, на основі простору та на основі місій; а також: комбінаторний метод, метод на основі вибірки та біологічний метод.

Окрім безпосередньо класифікації, додано інформацію про ключові особливості окремих груп методів та алгоритмів, а також інформацію стосовно конкретних алгоритмів-представників, що входять до тієї чи іншої групи алгоритмів у певній класифікації. При підготовці класифікації алгоритмів використовувались останні дослідження в області розробки алгоритмів побудови маршрутів руху БПЛА, включно з використанням штучного інтелекту та машинного навчання.

**Ключові слова:** БПЛА, маршрут, алгоритм, оптимальний маршрут, класифікація, критерій.

**Постановка проблеми.** Побудова маршруту руху БПЛА залежить від поставленого завдання і не може бути зведена суто до пошуку найкоротшого шляху. Більш важливим є досягнення поставленої мети (завдання). Отже, виникає необхідність ввести класифікацію методів побудови маршрутів руху БПЛА відповідно до різних критеріїв та завдань. Класифікація покликана спростити витрачені науковцями зусилля на вибір підходящого алгоритма або метода для досягнення поставленої мети. Додатковою мотивацією класифікувати методи та алгоритми побудови маршрутів руху БПЛА є те, що у цей час побудова маршруту руху одного агента є лише частиною сучасних завдань, оскільки все більше зростає потреба у комплексних рішеннях, в яких вимагається планування траєкторій руху одразу цілої зграї БПЛА або БПЛА у кооперації з певним видом транспорту.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

При підготовці класифікації алгоритмів використовувались останні дослідження в області розробки алгоритмів побудови маршрутів руху БПЛА. Дослідженнями займалися такі науковці: О. Романюк [1], Л. Коваль [1], В. Кулешов [1], М. Захарчук [1], Ло Дж. (Luo J.) [12], Тянь Ю. (Tian Y.) [12], Ван Ч. (Wang Z.) [12], Кадір З. (Qadir, Z.) [2], Уллах Ф. (Ullah, F.) [2], Мунавар Х.С. (Munawar, H.S.) [2], Аль-Турджман Ф. (Al-Turjman, F.) [2], Дебнат С.К. (Debnath, S.K.) [5], Омар Р. (Omar, R.) [5], Латип Н.Б. (Latip, N.B.) [5], Чжао Ю. Дж. (Zhao, Y.J.) [17], Чжен Ч. (Zheng, Z.) [17], Лю Ю. (Liu, Y.) [17] та інші.

**Постановка завдання.** Метою роботи є класифікація методів та алгоритмів побудови маршрутів БПЛА за різними критеріями.

**Виклад основного матеріалу.** Основною метою планування шляху (або побудови маршруту

руху) є швидке визначення оптимальної траєкторії в межах визначеного простору планування, який складається з кількох сегментів ліній або точок шляху. Представлення шляху може окреслюватися двома різними модальностями: одна включає часовий ряд, що містить параметри швидкості та курсу (на основі динаміки), а інша характеризується часовим рядом, що втілює просторові координати положення (на основі геометрії). Побудова маршруту руху БПЛА зазвичай потребує побудови відповідних цільових функцій відповідно до вимог поставлених завдань. Як правило, у якості цільової функції використовуються час польоту, відстань польоту, вартість та інші [12].

Отже, поставлені завдання відіграють ключову роль у класифікації алгоритмів. Розглянемо різні варіанти класифікації алгоритмів.

Стівен ЛаВалле [11] згрупував опис алгоритмів у логічні блоки, які можна розглядати як класифікацію алгоритмів **відповідно до умов руху БПЛА**:

– *Планування руху у безперервних просторах.* Ці методи та алгоритми використовуються для планування руху роботів у 2D або 3D просторах з перешкодами. Для полегшення обчислень безперервні моделі перетворюються на дискретні. Сюди включають комбінаторне планування для точного представлення проблеми, та методи на основі вибірок для ефективного вирішення складних завдань, хоча й з менш жорсткими гарантіями повноти. До даної категорії відносять: алгоритми, що оперують графами та виконують пошук: пошук у ширину (BFS – Breadth-First Search), пошук у глибину (DFS – Depth-First Search), Дейкстра, A\*, ітеративний пошук з поглибленням), задачі дискретизації, комбінаторне планування руху тощо.

– *Планування руху у просторі з урахуванням диференціальних обмежень.* Диференціальні обмеження регулюють допустимі швидкості в кожній точці. Ці обмеження враховуються для більш точного планування руху роботів, на відміну від глобальних обмежень через перешкоди як це робиться в попередній групі алгоритмів. Основна увага приділяється методам вибіркового планування та математичним технікам з теорії управління, щоб створювати плани, які відповідають природним рухам механічних систем. До цієї категорії відносяться алгоритми: метод ймовірнісної дорожньої карти (PRM – Probabilistic Roadmap Method) [9], швидке дослідження випадкового дерева (RRT – Rapidly-exploring Random Tree) [9], Марковський процес прийняття рішень (MDP – Markov Decision Process) [14] та їх варіа-

ції, методи декомпозиції клітин, методи на основі сіток тощо.

– *Планування руху в умовах невизначеності,* також називають «плануванням з використанням теорії прийняття рішень». Ця категорія охоплює алгоритми, що враховують невизначеність у передбачуванні майбутніх станів та невизначеність у визначенні поточного стану. Алгоритми цієї групи використовують моделі невизначеності, починаючи з прийняття одноразових рішень, продовжуючи плануванням із невизначеністю у передбачуваності, і завершуючи плануванням у інформаційному просторі, де важливо врахувати обмежену здатність сенсорів до точної оцінки поточного стану [11].

Інші дослідники запропонували класифікацію алгоритмів побудови маршрутів руху БПЛА **за типами задач** [1]:

- задачі розвідки;
- задачі доставки;
- задачі моніторингу.

Хоча кожен окремий тип задач буде визначатись своєю ціллю, проте дана класифікація не дає можливості назвати конкретні алгоритми, які б належали до тієї чи іншої групи. Один і той самий алгоритм у чистому чи модифікованому вигляді може бути використаний у двох або усіх групах.

Розглядаючи у якості критерію класифікації **алгоритмічний рівень**, алгоритми побудови маршрутів можна поділити на три категорії: традиційні, інтелектуальні та гібридні (рис. 1) [12].

*Традиційні* алгоритми спираються на інформацію про навколишнє середовище в межах математичної моделі робочого простору. З огляду на структуру та внутрішні властивості, традиційні алгоритми поділяються на чотири групи: на основі розбиття на клітинки (A\*), на основі математичних моделей (Nonlinear programming (NP) [8], Динамічне програмування (DP – Dynamic Programming) [13], Змішане цілочисельне програмування (MIP – Mixed-Integer Programming) [4], Управління прогнозуванням моделей (MPC – Model Predictive Control), функція Ляпунова), на основі графів (DFS, BFS, Дейкстра, RRT, PRM) і на основі потенціалів (метод потенційних полів (APF – Artificial Potential Fields)) [12].

*Інтелектуальні* алгоритми поділяються на алгоритми планування маршрутів *для рою БПЛА* та алгоритми *із застосуванням штучного інтелекту (ШІ)*. Алгоритми планування маршрутів для рою БПЛА включають:



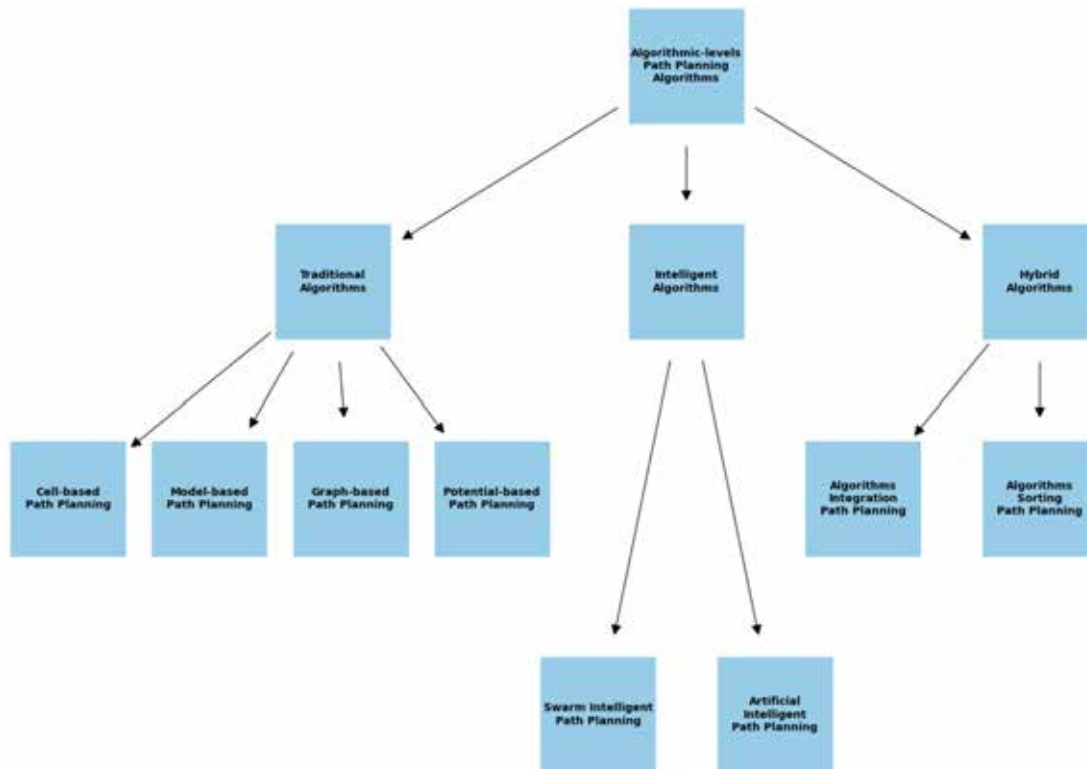


Рис. 1. Класифікація алгоритмів на основі алгоритмічних рівнів (за Ло Дж., Тянь Ю., Ван Ч.) [12]

– еволюційні алгоритми: Генетичний алгоритм (GA – Genetic Algorithm), Диференціальна еволюція (DE – Differential Evolution) [3], Генетичний алгоритм з не домінованим сортуванням II (NSGA-II – Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) [7].

– біологічно натхненні алгоритми: Оптимізація мурашиних колоній (ACO – Ant Colony Optimizer) [15], Оптимізація рою часток (PSO – Particle Swarm Optimizer) [6], Grey Wolf Optimizer (GWO), Колонія штучних бджіл (ABC – Artificial Bee Colony)

– різноманітні мета-евристичні алгоритми: Табу-пошук (TS – Tabu Search), Симульований відпал (SA – Simulated Annealing), Оптимізатор мультивсесвіту (MVO – Multi-Verse Optimizer), кластеризація.

Алгоритми із застосуванням III представлені алгоритмами: навчання з підкріпленням (RL – Reinforcement Learning) [10], штучними нейронними мережами, теорією ігор і алгоритмом глибокого навчання (DL – Deep Learning). В останні роки ці алгоритми відіграють все більш важливу роль в автономному керуванні польотом і прийнятті рішень БПЛА [12].

*Гібридні алгоритми.* Враховуючи сильні та слабкі сторони різних алгоритмів побудови маршрутів руху, дослідники нерідко досліджують інтеграцію кількох

алгоритмів, щоб використати їхні відповідні переваги та компенсувати недоліки. Таким чином створюються гібридні алгоритми. Гібридні алгоритми включають інтеграцію наявних алгоритмів і сортування, поєднуючи методи для підвищення загальної продуктивності. Важливо відзначити, що гібридні підходи побудови маршрутів спрямовані на використання взаємодоповнюючих переваг різних алгоритмів, забезпечуючи ефективне рішення проблем побудови маршрутів руху БПЛА. До гібридних алгоритмів належать наступні комбінації: RRT та APF, GA та Навчання з опцією відмови (LRO – Learning with Rejection Option), GA та APF, DE та Q-learning, ABC та алгоритм Кажанів (BA – Bat Algorithm), K-means та Адаптивний симульований відпал (ASO – Adaptive Simulated Annealing), Оптимізація рою часток з квантовою поведінкою (QPSO – Quantum-behaved Particle Swarm Optimization) та DE [12].

Розглянемо також класифікацію алгоритмів за **функціональним рівнем**. Ця класифікація поділяє алгоритми побудови маршрутів за такими трьома аспектами: *на основі часу (time-based)*, *на основі простору (space-based)* та *на основі місії (missions-based)*. У якості складових mission-based алгоритмів введено задачу про найкоротший шлях, задачу комівояжера (TSP) і задачу покриття території. На рисунку 2 показано класифікацію алгоритмів побудови маршрутів на рівні функції.

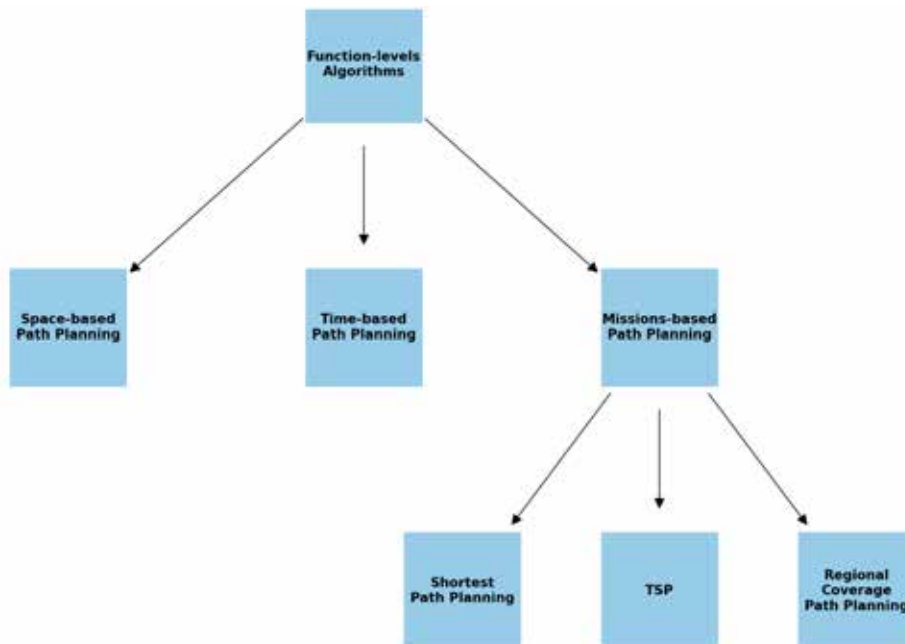


Рис. 2. Класифікація алгоритмів побудови маршрутів на рівні функції (за Ло Дж., Тянь Ю., Ван Ч.) [12]

*Spaced-based* алгоритми зосереджені на тому, як алгоритми обробляють складнощі середовища у просторі, враховуючи такі фактори, як перешкоди, рельєф і 3D-простір. Оцінка ефективності *spaced-based* алгоритмів здійснюється за просторовими характеристиками у різних робочих умовах. Алгоритми побудови маршрутів руху на основі часу аналізуються на основі їх часових характеристик, тобто з точки зору планування часу, швидкості реагування та адаптації до динамічних і чутливих до часу середовищ. Мета полягає в тому, щоб зрозуміти, наскільки добре алгоритми вирішують часові обмеження, властиві місіям БПЛА. *Missions-based* алгоритми відповідно оцінюються за показниками досягнення конкретних вимог місії, наприклад охоплення території або оптимізація параметрів місії. Різні місії БПЛА можуть вимагати різних підходів до планування шляху. Самими популярними підкатегоріями *missions-based алгоритмів* є: пошук найкоротшого шляху, TSP (задача комівояжера) та Regional Coverage Path Planning (Планування маршрутів для покриття регіону). Важливо відмітити, що пошук найкоротшого шляху є важливим у майже всіх задачах побудови маршрутів руху БПЛА. Тобто, може бути визначений як підпроблема для TSP та Regional Coverage Path Planning. Проте, якщо розглядати контекст тривимірного планування маршрутів, то оптимальний шлях не завжди буде найкоротшим шляхом завдяки, наприклад, впливу рельєфу місцевості або фізичних обмежень БПЛА. Ефективним методом

вирішення проблеми найкоротшого шляху може бути рекурентний нейронний мережевий підхід, у якому враховується діапазон динамічних факторів окрім просто оптимізації відстані чи часу [16]. TSP у побудові маршрутів руху БПЛА передбачає оптимізацію часу подорожі або відстані до вибраних маршрутних точок, де БПЛА виконує роль комівояжера, відвідуючи кожен пункт місії один раз. Regional Coverage Path Planning за мету мають мінімізацію споживання енергії, часу місії або максимізацію покриття. Особливістю цієї категорії є вирішення потенційних конфліктів, що виникають внаслідок накладених умов.

Ще одним варіантом класифікації алгоритмів побудови маршрутів є класифікація *за методом* (або підходом планування), до якого належить алгоритм. Дана класифікація дозволяє легко розібратись у природі того чи іншого алгоритма, зрозуміти який метод він використовує за основу. Як зазначають Дебнат С.К., Омар Р. та Лапит Н.Б. лише побудови оптимального маршруту недостатньо, оскільки це може спричинити вище споживання енергії безпілотним літальним апаратом, ніж будуючи субоптимальний маршрут. Розповсюдженою задачею планування траєкторії руху БПЛА є політ від заданої початкової точки до кінцевої точки у просторі з перешкодами. Перешкоди зазвичай не закріплені в одному місці та є динамічними, що вимагає обрахунок траєкторії під час польоту. Енергоефективне планування маршруту повинно гарантувати, що метод/алгоритм створить безпечний та оптимальний

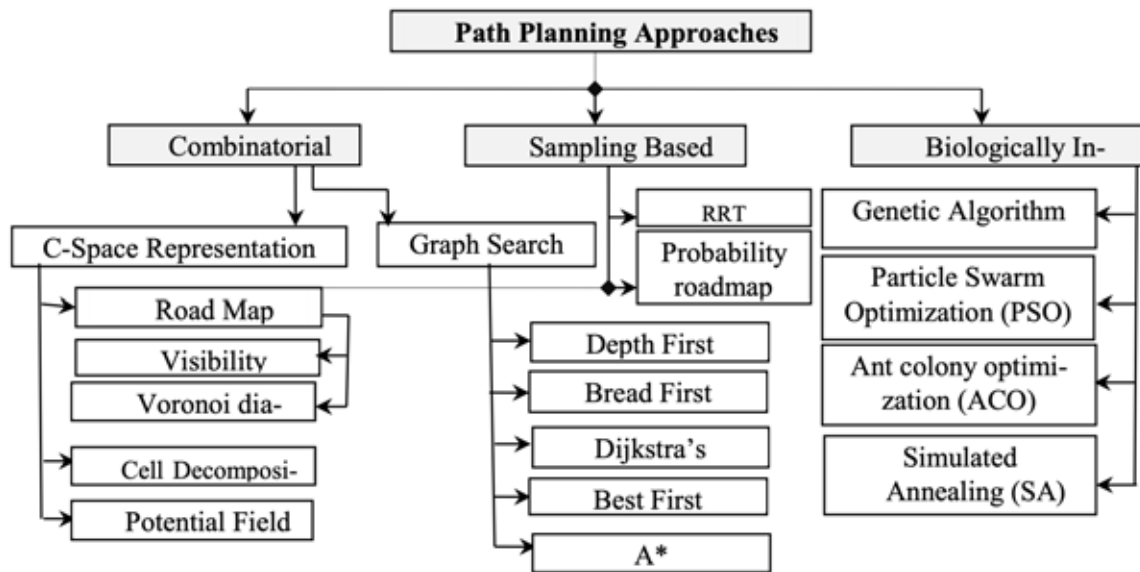


Рис. 3. Класифікація алгоритмів планування маршрутів за критерієм використаного метода (за Дебнат, С.К.; Омар, Р.; Латип, Н.Б.) [5]

маршрут і одночасно мінімізує тривалість подорожі та заощадить енергію. За цією класифікацією є три методи планування шляхів: комбінаторний, на основі вибірки та біологічний (рис. 3) [5].

**Висновки.** Будучи базовою технологією, що дозволяє БПЛА виконувати різноманітні завдання, планування маршруту відіграє вирішальну роль у багатьох програмах у сфері БПЛА. Ця стаття пропонує класифікацію алгоритмів побудови маршрутів руху БПЛА наступними критеріями: відповідно до умов руху БПЛА, за типами задач, за алгоритмічним рівнем, за функціональним рівнем та методом планування шляху. Кожен критерій має свою цінність для науковців при виборі

кінцевого алгоритму побудови маршруту руху або плануванні місії.

У плануванні маршрутів ключову роль відіграє поняття критерію оптимальності, яке виходить на перший план при виборі того чи іншого алгоритму побудови маршрутів руху БПЛА. Вибір певного алгоритму чи групи алгоритмів науковцями повинен розпочинатись з визначення поставленого завдання, і як результату обрання критерію за яким потрібно порівнювати та аналізувати алгоритми, приймаючи остаточне рішення.

Областю подальших досліджень може бути порівняння характеристик наявних алгоритмів та методів, визначення їх сильних та слабких сторін.

#### Список літератури:

1. Класифікація безпілотних літальних апаратів / О. Романюк та ін. 2023.
2. Addressing disasters in smart cities through UAVs path planning and 5G communications: A systematic review / Z. Qadir та ін. *Computer Communications*. 2021. Т. 168. С. 114–135. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2021.01.003>.
3. An improved differential evolution based artificial fish swarm algorithm and its application to AGV path planning problems / G. Li та ін. *2017 36th Chinese Control Conference (CCC)*, м. Dalian, China, 26–28 лип. 2017 р. 2017. URL: <https://doi.org/10.23919/chicc.2017.8027746>.
4. Chaudhry A., Misovec K., D'Andrea R. Low observability path planning for an unmanned air vehicle using mixed integer linear programming. *2004 43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC) (IEEE Cat. No.04CH37601)*, м. Nassau, Bahamas, 17 груд. 2004 р. 2004. URL: <https://doi.org/10.1109/cdc.2004.1429334>.
5. Debnath S. K., Omar R., Latip N. B. A. A Review on Energy Efficient Path Planning Algorithms for Unmanned Air Vehicles. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Singapore, 2018. С. 523–532. URL: [https://doi.org/10.1007/978-981-13-2622-6\\_51](https://doi.org/10.1007/978-981-13-2622-6_51).
6. Energy-efficient Path Planning and Control Approach of USV Based on Particle Swarm optimization / F. Ding та ін. *OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston*, м. Charleston, SC, 22–25 жовт. 2018 р. 2018. URL: <https://doi.org/10.1109/oceans.2018.8604920>.
7. Gupta G. P., Chawra V. K., Dewangan S. Optimal path planning for UAV using NSGA-II based meta-heuristic for sensor data gathering application in Wireless Sensor Networks. *2019 IEEE International Conference*

on *Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*, м. GOA, India, 16–19 груд. 2019 р. 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/ants47819.2019.9118104>.

8. Karatas T., Bullo F. Randomized searches and nonlinear programming in trajectory planning. *40th Conference on Decision and Control*, м. Orlando, FL, USA, 4 груд. 2001 р. URL: <https://doi.org/10.1109/cdc.2001.981008>.

9. Kavraki L. E., Kolountzakis M. N., Latombe J. C. Analysis of probabilistic roadmaps for path planning. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 1998. Т. 14, № 1. С. 166–171. URL: <https://doi.org/10.1109/70.660866>.

10. Kim H., Lee W. Real-Time Path Planning Through Q-learning's Exploration Strategy Adjustment. *2021 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC)*, м. Jeju, Korea (South), 31 січ. – 3 лют. 2021 р. 2021. URL: <https://doi.org/10.1109/iceic51217.2021.9369749>.

11. LaValle S. M. *Planning Algorithms*. Cambridge University Press, 2006. 842 с.

12. Luo J., Tian Y., Wang Z. Research on Unmanned Aerial Vehicle Path Planning. *Drones*. 2024. Т. 8, № 2. С. 51. URL: <https://doi.org/10.3390/drones8020051>.

13. Mokrane A., Braham A. C., Cherki B. UAV Path Planning Based on Dynamic Programming Algorithm On Photogrammetric DEMs. *2020 International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, м. Istanbul, Turkey, 25–27 верес. 2020 р. 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/icee49691.2020.9249903>.

14. Ragi S., Chong E. K. P. UAV Path Planning in a Dynamic Environment via Partially Observable Markov Decision Process. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2013. Т. 49, № 4. С. 2397–2412. URL: <https://doi.org/10.1109/taes.2013.6621824>.

15. Real-time Dynamic Track Planning of Multi-UAV Formation Based on Improved Artificial Bee Colony Algorithm / G. Tian та ін. *2018 37th Chinese Control Conference (CCC)*, м. Wuhan, 25–27 лип. 2018 р. 2018. URL: <https://doi.org/10.23919/chicc.2018.8482622>.

16. Wang J. A recurrent neural network for solving the shortest path problem. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*. 1996. Т. 43, № 6. С. 482–486. URL: <https://doi.org/10.1109/81.503260>.

17. Zhao Y., Zheng Z., Liu Y. Survey on computational-intelligence-based UAV path planning. *Knowledge-Based Systems*. 2018. Т. 158. С. 54–64. URL: <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2018.05.033>.

## **Kucherenko O.I., Vakaliuk T.A. CLASSIFICATION OF METHODS AND ALGORITHMS FOR CONSTRUCTING UAV ROUTES**

*The dynamic nature of UAVs, thanks to their high mobility, allows the adjustment of the movement trajectory in real time to adapt to different environmental conditions. A common task of UAV trajectory planning is to fly from a given starting point to an end point in an obstacle-filled space. Obstacles are usually not fixed in one place, but change over time and are difficult to accurately model, requiring in-flight trajectory corrections. Planning such trajectories can require complex calculations that will take a large amount of time, which is not acceptable for UAVs for reasons of both safety and energy efficiency. Therefore, engineers must be responsible for the choice of the applied algorithm for constructing the UAV movement route. Therefore, the classification and generalization of UAV route construction algorithms become necessary.*

*The paper presents the classification of methods and algorithms for constructing UAV traffic routes according to five criteria: according to UAV traffic conditions, by types of tasks, by algorithmic level, by functional level, and by the path planning method. Summarizing everything together, the following groups of algorithms and methods are considered: motion planning in continuous spaces, in space with differential constraints and in conditions of uncertainty; traditional, intelligent and hybrid algorithms; time-based, space-based, and mission-based planning; as well as: the combinatorial method, the sampling-based method, and the biological method.*

*In addition to the classification itself, information is added about the key features of certain groups of methods and algorithms, as well as information about specific representative algorithms included in one or another group of algorithms in a certain classification. When preparing the classification of algorithms, the latest research in the field of development of algorithms for constructing UAV traffic routes was used, including the use of artificial intelligence and machine learning.*

**Key words:** UAV, route, algorithm, optimal route, classification, criterion.

**Кучинська К.А.**

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

**Новіков П.В.**

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

**Волощук В.А.**

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

**Степанець О.В.**

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

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КОНДЕНСАЦІЙНОГО КОТЛА ДЛЯ ПОБУДОВИ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА

*У статті проведений аналіз динамічних характеристик конденсаційного котла при роботі на усіх можливих режимах експлуатації. Метою статті є отримання математичної моделі конденсаційного котла як об'єкту керування, що враховує зміни параметрів залежно від режиму роботи. Отримана модель планується використовуватися для побудови цифрового двійника конденсаційного котла в системі керування і аналізу ефективності функціонування обладнання. Наведена структурна схема складових цифрового двійника досліджуваного конденсаційного котла. Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій щодо розробки математичних моделей конденсаційних котлів. Наведений опис технологічної схеми модульного конденсаційного котла. Побудована схема зв'язків вхід-вихід технологічного об'єкту керування. Математичні моделі у вигляді функцій передачі розроблено на основі експериментальних даних, які відображають роботу котла на усьому робочому діапазоні. Оцінювання точності отриманих моделей здійснено за середнє квадратичним критерієм. Проведено аналіз параметрів моделі на нелінійність залежно від режиму роботи об'єкта дослідження. Для деяких параметрів моделі, зокрема коефіцієнтів підсилення і часового запізнення, спостерігається суттєва зміна значень в залежності від режиму роботи котла, інші параметри практично не залежать від режиму роботи об'єкта. Для параметрів моделі, що залежать від режиму роботи конденсаційного котла, знайдено математичні залежності, які описують зміну цих параметрів в залежності від значень вхідних величин. Отримані залежності подані у вигляді як формул, так і просторових поверхонь для графічного представлення. Розроблена модель конденсаційного котла в подальшому буде використана для розробки цифрового двійника конденсаційного котла. Наведена структура цифрового двійника досліджуваного конденсаційного котла із зазначенням функцій компонентів системи.*

**Ключові слова:** конденсаційний котел, динамічні характеристики, аналіз нелінійності параметрів, цифровий двійник, моделювання, математична модель.

**Постановка проблеми.** За різними оцінками приблизно 40 % котельно-пічного палива України, а це в основному імпортований природний газ, спрямовується на теплозабезпечення населення [1]. Саме в теплозабезпечення населених пунктів сконцентровано суттєвий потенціал енергозаощадження та зниження негативного впливу підприємств комунального теплозабезпечення на довкілля.

Одним із досягнень сучасної опалювальної техніки є використання конденсаційної технології для підвищення ефективності опалювальних котлів [2]. Основна задача конденсаційної тех-

ніки – охолодити продукти згоряння нижче температури точки роси і відібрати теплоту конденсації водяної пари для використання її в корисних цілях. Відповідно, ефективна робота конденсаційного котла має місце лише при застосуванні низькотемпературних (низькоексергетичних) систем теплозабезпечення будинків із відповідними теплотехнічними характеристиками. Результати напрацювань, отриманих вітчизняними та зарубіжними вченими, доводять перспективність розвитку низькотемпературних (низькоексергетичних) систем теплозабезпечення будівель [3; 4].

Прорив у розвитку цифрових технологій (збільшення обчислювальних потужностей і зниження їх вартості) дає змогу об'єднати інформаційні технології з операційними процесами і створити так звані цифрові двійники фізичних об'єктів. Заснований на великому обсязі накопичених даних, отриманих в ході вимірювань цілого ряду показників за період експлуатації, та відповідних математичних і комп'ютерних моделях, цифровий двійник дає можливість більш точно оцінити та спрогнозувати поведінку об'єкту, швидше виявити можливі дефекти у ньому, обґрунтовано запропонувати технічні зміни і, як наслідок, підвищити ефективність відповідно до вибраних критеріїв [5].

Концептуально складовими цифрового двійника є дані, різноманітні моделі та сервісні інтерфейси (рис. 1). Цифровий двійник повинен містити дані про свою фізичну копію, тому що вони використовуються у моделях для відображення та оцінки стану і поведінки об'єкта. Дані можуть містити не лише технологічну інформацію від сенсорів та виконавчих механізмів, а й відомості впродовж всього життєвого циклу об'єкта – від проектування (конструкторські моделі, специфікації, технічні характеристики), процесу та специфіки реалізації (методи виробництва та дані

про контроль якості), експлуатації (конфігурації, режими роботи, поточні та архівні дані, відмітки про обслуговування) до процедури утилізації.

Для розуміння та прогнозування робочих станів і поведінки екземпляра об'єкта цифрова копія повинна включати в себе аналітичні або розрахункові моделі, а також моделі, які сприяють оцінці можливих впливів та прийняттю релевантних рішень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Висока ефективність конденсаційних котлів (ККД>90 %) та постійне всесвітнє зростання цін на паливо роблять їх все привабливішими для споживачів, не зважаючи на вищу вартість ніж у традиційних котлів [3]. Однак, досягнення високої ефективності конденсаційних котлів можливе лише при їх експлуатації в оптимальному режимі, що може забезпечити лише правильно підібрана, налаштована та впроваджена система автоматизації.

Традиційний підхід до створення класичної системи автоматизації передбачає наявність моделі об'єкта автоматизації. Модель може бути представлена у багатьох видах [6–8]. Розрахунок класичної системи автоматизованого керування вимагає функції передачі об'єкта керування. Для отримання цих функцій передачі необхідно мати розгінні характеристики об'єкта (реакцію на сту-



Рис. 1. Складові цифрового двійника

пінчасте збурення) і провести процедуру ідентифікації. Процедура ідентифікації складається з двох головних етапів: вибору структури функції передачі та підбору параметрів відповідно до обраного виду функції передачі. Існує багато аналітичних та графічних методів для ідентифікації параметрів об'єкту: метод логарифмування, метод дотичної, метод 2/3 та інші [9–11].

**Постановка завдання.** Метою статті є отримання математичної моделі конденсаційного котла як об'єкту керування, що враховує зміни параметрів залежно від режиму роботи. Для досягнення мети необхідно виконати наступні завдання: розробка моделі об'єкту керування, що враховує зміни параметрів залежно від режиму роботи котла; аналіз параметрів моделі на нелінійність.

**Виклад основного матеріалу**

**Опис технологічного об'єкту управління**

Модуль конденсаційного котла складається з двох паралельно підключених нагрівальних елементів (проточних водонагрівачів), які окремо розташовані одні над одним. На рис. 2 зображено технологічну схему модульного конденсаційного котла.

Кожен нагрівальний елемент має конденсаційний теплообмінник 1, в якому теплоносієм проходить через паралельно підключені спіральні трубчасті елементи, які утворюють камеру згорання.

У центрі камери згорання знаходиться газовий пальник типу «премікс» з електродами розпалювання і контролю полум'я. Перед згоранням на пальник подається попередньо приготована суміш газу з повітрям через газохід 2. Суміш подається за допомогою вентилятора 3, що має змінне число обертів, яке задається блоком керування в залежності від необхідної потужності, здійснюється так звана «модуляція полум'я», що регулюється в межах від 20 % до 100 % від номінальної потужності. Вентилятор всмоктує повітря через сопло, що зв'язане з газовим клапаном, який подає газ на вхід вентилятора у кількості, яка пропорційна кількості всмоктаного повітря. Відпрацьовані димові гази відводяться з камер згорання у димохід. У процесі згорання палива утворюється конденсат, який збирається у сифонах-конденсатозбірниках. Звідти конденсат потрапляє у загальну систему видалення конденсату, що монтується при складанні модулів у котельну установку.

Теплоносієм з колектора «зворотної» лінії системи опалення T2 (від споживача) рухається за допомогою циркуляційних насосів 4 через трубопроводи з датчиками потоку до теплообмін-

ника. Після проходження теплообмінника, де відбувається нагрівання теплоносія димовими газами, він надходить у подаючий колектор T1 (до споживача). Усі трубопроводи оснащені запірною арматурою, що дає можливість відключати окремі частини модуля від загальних колекторів для зручного обслуговування. Також зворотний на подаючий колектори закінчуються фланцями, що призначені для монтажу модуля в котельну установку.

Вздовж горизонтальної осі модуля проходить газовий колектор G1, який також закінчується приєднувальними фланцями, що дає можливість отримати загальний газовий колектор при об'єднанні декількох модулів в котельну установку.

Конденсаційний котел як об'єкт керування має два вихідних параметри:

- температура теплоносія, у даному випадку води, який надходить у подаючий колектор T1 (до споживача), надалі T\_W\_OUT;
- температура димових газів у димоході, надалі T\_G\_OUT.

Також конденсаційний котел як об'єкт керування має два основних вхідних параметри:

- кількість газу, що подається у пальник, надалі V\_G\_IN;

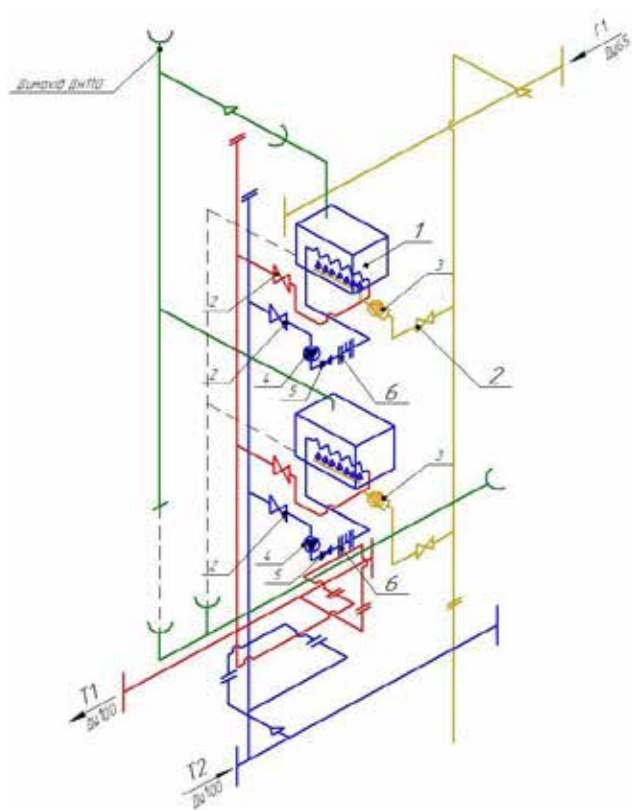


Рис. 2. Технологічна схема модульного конденсаційного котла

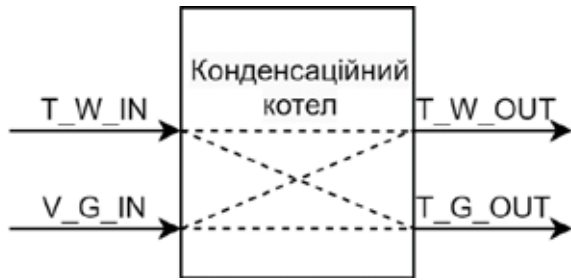


Рис. 3. Параметрична схема конденсаційного котла

- температура теплоносія (води) з колектора «зворотної» лінії системи опалення Т2 (від споживача), надалі  $T_{W\_IN}$ .

На рис. 3 представлено параметричну схему конденсаційного котла як об'єкта керування [12].

Модель об'єкта керування представлятиметься у вигляді функцій передачі. Для визначення видів та параметрів функцій передачі було проведено 50 експериментів та отримано розгінні характеристики конденсаційного котла при різних режимах роботи. У табл. 1 наведено список температур теплоносія на вході у котел та витрати газу для яких було проведено експерименти для отримання розгінних характеристик.

На рисунку 4 наведено приклад графіку отриманих даних:  $T_{W\_IN}$  має стале значення  $50\text{ }^\circ\text{C}$ , а  $V_{G\_IN}$  змінюється від 10 % до 100 % від номі-

Таблиця 1

Значення вхідних параметрів котла для отримання розгінних характеристик

| № з.п. | Значення $T_{W\_IN}$ , $^\circ\text{C}$ | Значення $V_{G\_IN}$ , % від номінального значення |
|--------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 1      | 25                                      | 10                                                 |
| 2      | 30                                      | 20                                                 |
| 3      | 40                                      | 40                                                 |
| 4      | 50                                      | 60                                                 |
| 5      | 60                                      | 80                                                 |
| 6      | 70                                      | 100                                                |

нального значення витрати газу. На рисунку 5 наведено графік отриманих даних при сталому значенні  $V_{G\_IN}$  20 % від номінальної витрати газу, а  $T_{W\_IN}$  змінюється від  $25\text{ }^\circ\text{C}$  до  $70\text{ }^\circ\text{C}$ .

Структури функцій передачі, якими здійснювалася апроксимація перехідних характеристик:

- для каналу “ $T_{W\_IN} \rightarrow T_{G\_OUT}$ ” було обрано інерційну ланку першого порядку з транспортним запізненням(АП1) її вигляд наведено у формулі (1);

- для каналів “ $T_{W\_IN} \rightarrow T_{W\_OUT}$ ” та “ $V_{G\_IN} \rightarrow T_{W\_OUT}$ ” було обрано інерційну ланку другого порядку(АП2), її вигляд наведено у формулі (2);

- для каналу “ $V_{G\_IN} \rightarrow T_{G\_OUT}$ ” було обрано інтегро-диференціовальну ланку(ІД), її вигляд наведено у формулі (3).

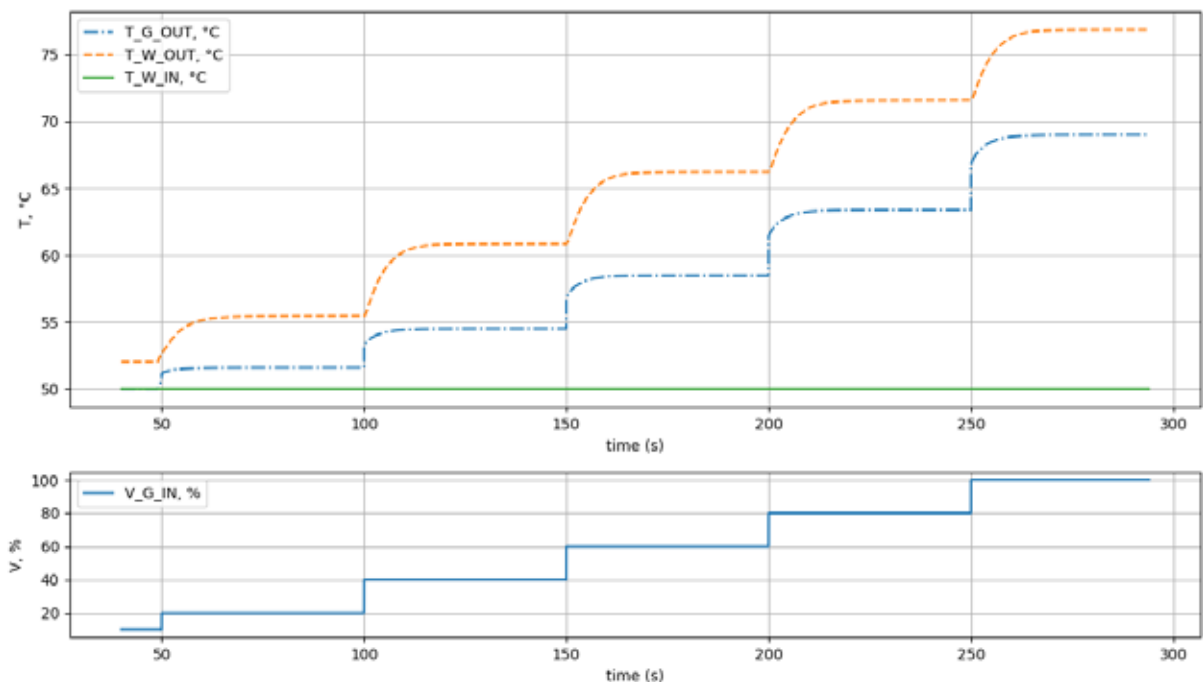


Рис. 4. Графік отриманих даних для  $T_{W\_IN}$  дорівнює  $50\text{ }^\circ\text{C}$  і  $V_{G\_IN}$  змінюється від 10 % до 100 % від номінального значення витрати газу



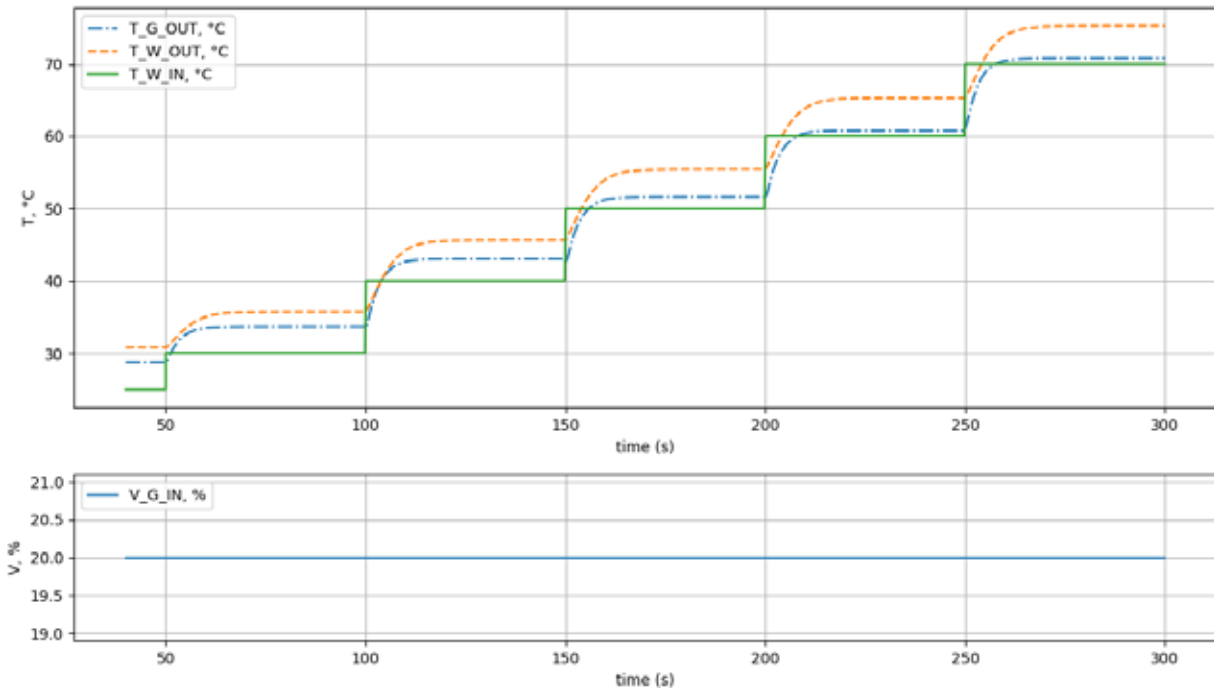


Рис. 5. Графік отриманих даних для V\_G\_IN дорівнює 20 % і T\_W\_IN змінюється від 25 °C до 70 °C

$$W_{АП1}(s) = \frac{K}{T \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau \cdot s}, \quad (1)$$

де  $K$  – коефіцієнт підсилення;  $T$  – постійна часу в секундах;  $\tau$  – часова затримка в секундах.

$$W_{АП2}(s) = \frac{K}{(T_1 \cdot s + 1) \cdot (T_2 \cdot s + 1)}, \quad (2)$$

де  $K$  – коефіцієнт підсилення;  $T_1$  та  $T_2$  – постійні часу в секундах.

$$W_{ІД}(s) = \frac{K \cdot (T_2 \cdot s + 1)}{T_1 \cdot s + 1}, \quad (3)$$

де  $K$  – коефіцієнт підсилення;  $T_1$  та  $T_2$  – постійні часу в секундах.

Критерієм для оцінки похибки між моделлю та реальними даними було обрано MSE (mean square error – середнє квадратичне відхилення), формулу розрахунку наведено у рівнянні (4).

$$MSE = \frac{\sum (y_i - p_i)^2}{n}, \quad (4)$$

де  $y_i$  – реальне значення у момент часу  $i$ ;  $p_i$  – прогнозоване значення у момент часу  $i$ ;  $n$  – кількість точок.

Таблиця 2

**Оцінка похибок між реальними значеннями та моделлю конденсаційного котла**

| Функція передачі | Канал            | Середнє значення MSE |
|------------------|------------------|----------------------|
| АП2              | “T_W_IN→T_W_OUT” | 0,000045             |
| АП2              | “V_G_IN→T_W_OUT” | 0,00000095           |
| АП1              | “T_W_IN→T_G_OUT” | 0,0031               |
| ІД               | “V_G_IN→T_G_OUT” | 0,001                |

**Результати ідентифікації**

На рисунках 6–8 зображено графіки зміни параметрів функції передачі у вигляді інерційної ланки другого порядку за каналом “T\_W\_IN→T\_W\_OUT”. Проаналізувавши графіки зроблено висновок, що для параметрів  $T1$  та  $T2$  функції передачі за каналом “T\_W\_IN→T\_W\_OUT” недоцільно виводити залежність від значень вхідних параметрів V\_G\_IN та T\_W\_IN, а доцільно взяти усереднене значення. Для коефіцієнта підсилення  $K$  функції передачі за каналом “T\_W\_IN→T\_W\_OUT” доцільно вивести залежність від значень вхідних параметрів V\_G\_IN та T\_W\_IN.

Параметри моделі перехідного процесу за каналом “T\_W\_IN→T\_W\_OUT” у вигляді інерційної ланки другого порядку наведено у формулі (5):

$$K = f(V_G\_IN, T\_W\_IN) \quad (5)$$

$$T_1 = 4.1s$$

$$T_2 = 1.6s.$$

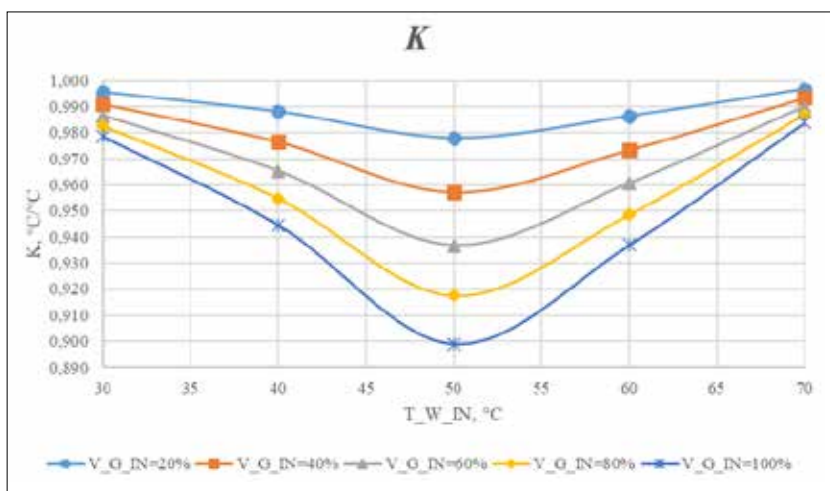


Рис. 6. Зміна коефіцієнта підсилення  $K$  у функції передачі за каналом “ $T_{W\_IN} \rightarrow T_{W\_OUT}$ ” в залежності від значень  $V_{G\_IN}$  та  $T_{W\_IN}$

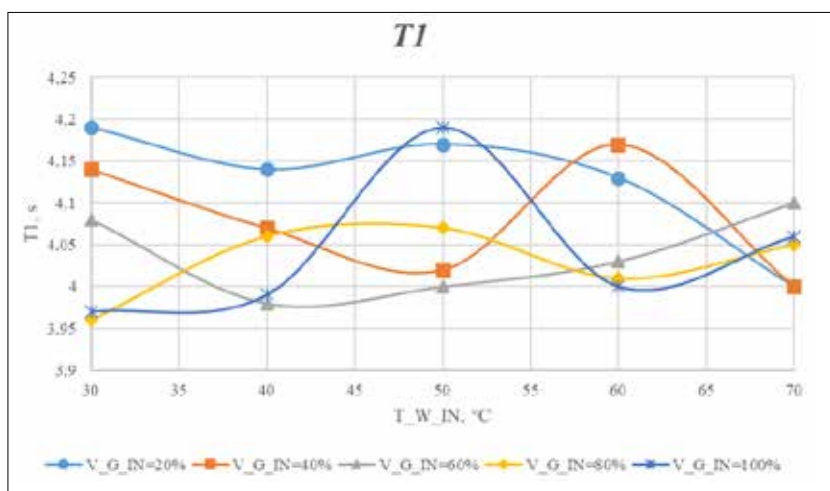


Рис. 7. Зміна сталої часу  $T_1$  у функції передачі за каналом “ $T_{W\_IN} \rightarrow T_{W\_OUT}$ ” в залежності від значень  $V_{G\_IN}$  та  $T_{W\_IN}$

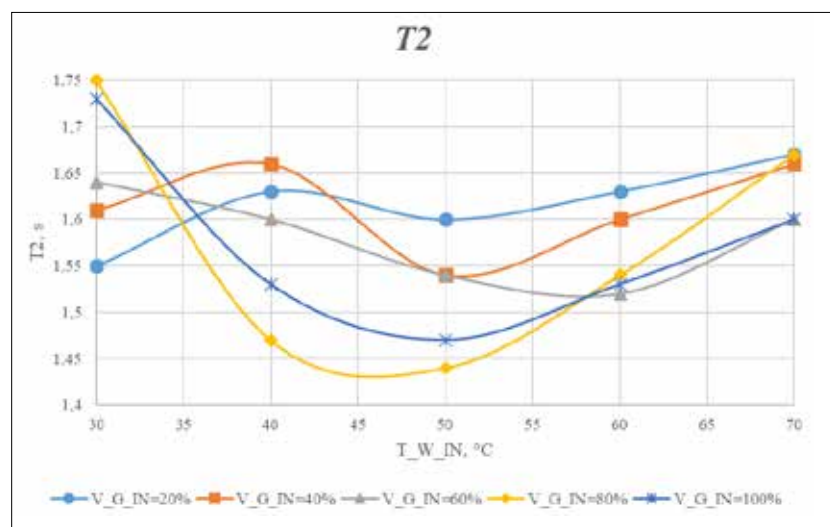


Рис. 8. Зміна сталої часу  $T_2$  у функції передачі за каналом “ $T_{W\_IN} \rightarrow T_{W\_OUT}$ ” в залежності від значень  $V_{G\_IN}$  та  $T_{W\_IN}$

На рисунках 9–11 зображено графіки зміни параметрів функції передачі у вигляді інерційної ланки першого порядку за каналом “T\_W\_IN→T\_G\_OUT”. Проаналізувавши графіки зроблено висновок, що для сталої часу  $T$  функції передачі за каналом “T\_W\_IN→T\_G\_OUT” недоцільно виводити залежність від значень вхідних параметрів  $V_G\_IN$  та  $T\_W\_IN$ , а доцільно взяти усереднене значення. Для параметрів  $K$  та  $\tau$  функції передачі за каналом “T\_W\_IN→T\_G\_OUT” доцільно вивести залежність від значень вхідних параметрів  $V_G\_IN$  та  $T\_W\_IN$ .

На рисунках 12–14 зображено графіки зміни параметрів функції передачі у вигляді інерційної ланки другого порядку за каналом “V\_G\_IN→T\_W\_OUT”.

Параметри моделі перехідного процесу за каналом “T\_W\_IN→T\_G\_OUT” у вигляді інерційної ланки першого порядку з транспортним запізненням наведено у формулі (6):

$$K = f(V_G\_IN, T\_W\_IN)$$

$$T = 3.11s$$

$$\tau = f(V_G\_IN, T\_W\_IN).$$
(6)

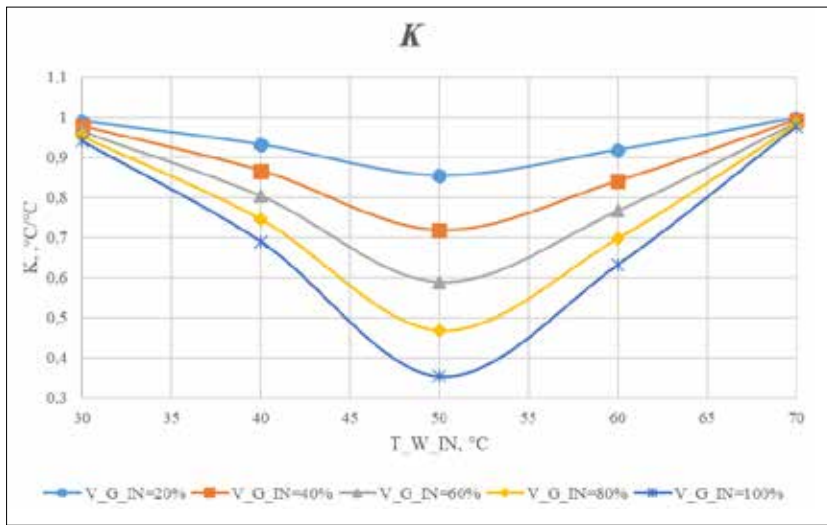


Рис. 9. Зміна коефіцієнта підсилення  $K$  у функції передачі за каналом “T\_W\_IN→T\_G\_OUT” в залежності від значень  $V_G\_IN$  та  $T_W\_IN$

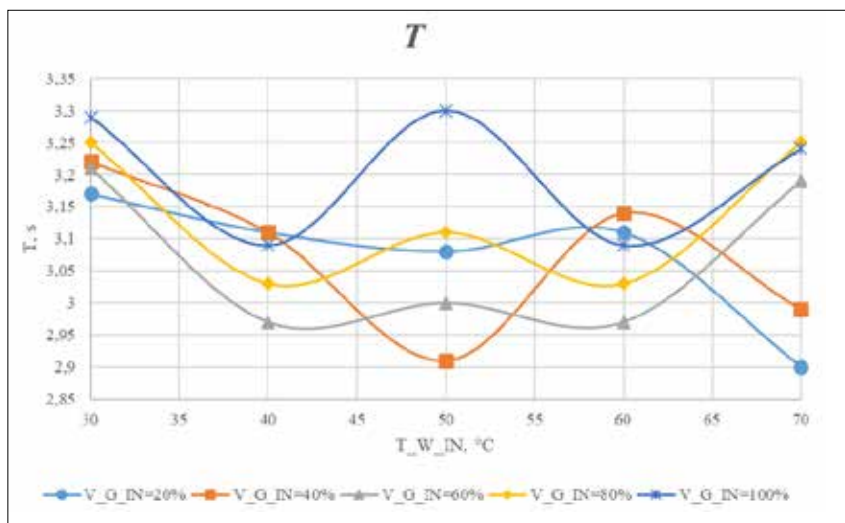


Рис. 10. Зміна сталої часу  $T$  у функції передачі за каналом “T\_W\_IN→T\_G\_OUT” в залежності від значень  $V_G\_IN$  та  $T_W\_IN$

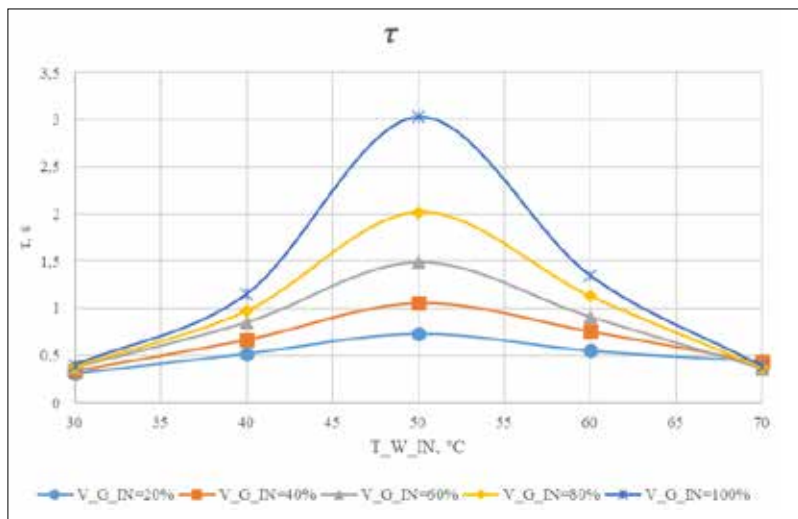


Рис. 11. Зміна часової затримки  $\tau$  у функції передачі за каналом “ $T_{W\_IN} \rightarrow T_{G\_OUT}$ ” в залежності від значень  $V_{G\_IN}$  та  $T_{W\_IN}$

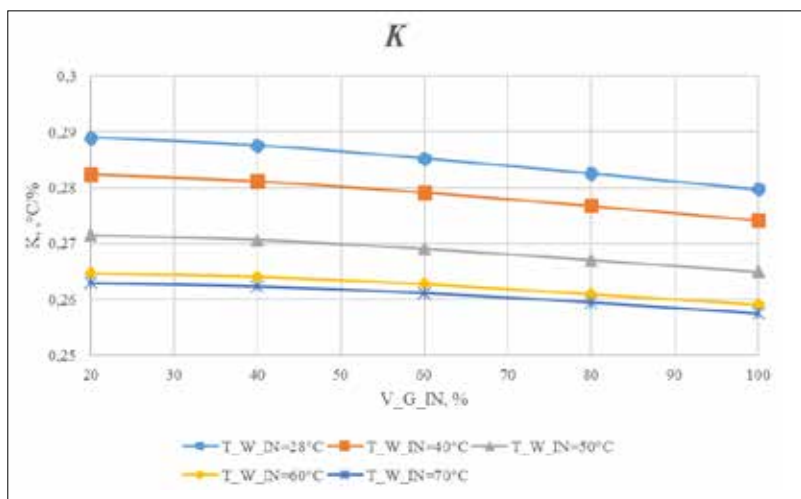


Рис. 12. Зміна коефіцієнта підсилення  $K$  у функції передачі за каналом “ $V_{G\_IN} \rightarrow T_{W\_OUT}$ ” в залежності від значень  $V_{G\_IN}$  та  $T_{W\_IN}$

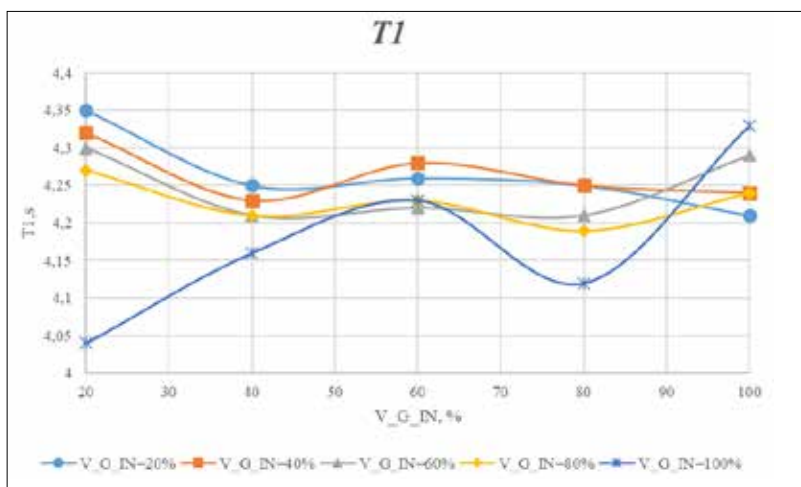


Рис. 13. Зміна сталої часу  $Tl$  у функції передачі за каналом “ $V_{G\_IN} \rightarrow T_{W\_OUT}$ ” в залежності від значень  $V_{G\_IN}$  та  $T_{W\_IN}$

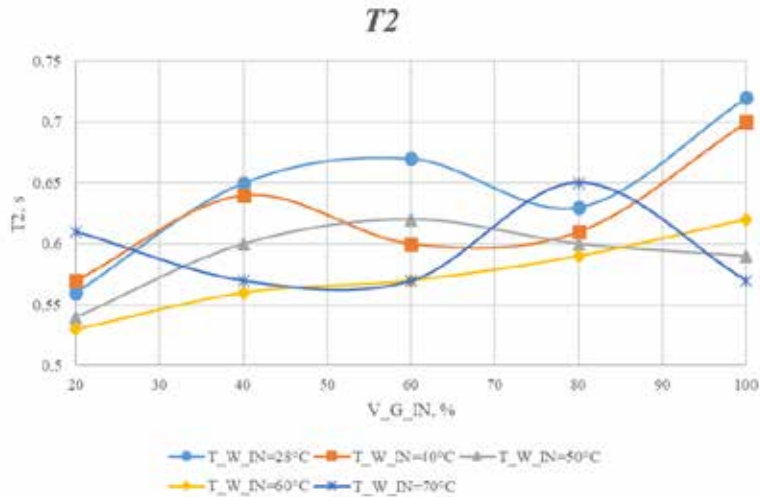


Рис. 14. Зміна сталої часу  $T_2$  у функції передачі за каналом “ $V_{G\_IN} \rightarrow T_{W\_OUT}$ ” в залежності від значень  $V_{G\_IN}$  та  $T_{W\_IN}$

Проаналізувавши графіки на рисунках 12–14 зроблено висновок, що для сталої часу усіх параметрів функції передачі за каналом “ $V_{G\_IN} \rightarrow T_{W\_OUT}$ ” недоцільно виводити залежність від значень вхідних параметрів  $V_{G\_IN}$  та  $T_{W\_IN}$ , а доцільно взяти усереднене значення.

Параметри моделі перехідного процесу за каналом “ $V_{G\_IN} \rightarrow T_{W\_OUT}$ ” у вигляді інерційної ланки другого порядку наведено у формулі (7):

$$\begin{aligned}
 K &= 0,2711^\circ\text{C} / \% \\
 T_1 &= 4,24\text{ s} \\
 T_2 &= 0,61\text{ s}.
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

На рисунках 15–17 зображено графіки зміни параметрів функції передачі у вигляді інтегро-диференціовальної ланки за каналом “ $V_{G\_IN} \rightarrow T_{G\_OUT}$ ”. Проаналізувавши графіки зроблено висновок, що для параметрів  $T_1$  та  $T_2$  функції передачі за каналом “ $V_{G\_IN} \rightarrow T_{G\_OUT}$ ” недоцільно виводити залежність від значень вхідних параметрів  $V_{G\_IN}$  та  $T_{W\_IN}$ , а доцільно взяти усереднене значення. Для коефіцієнту підсилення  $K$  функції передачі за каналом “ $V_{G\_IN} \rightarrow T_{G\_OUT}$ ” доцільно вивести залежність від значень вхідних параметрів  $V_{G\_IN}$  та  $T_{W\_IN}$ .

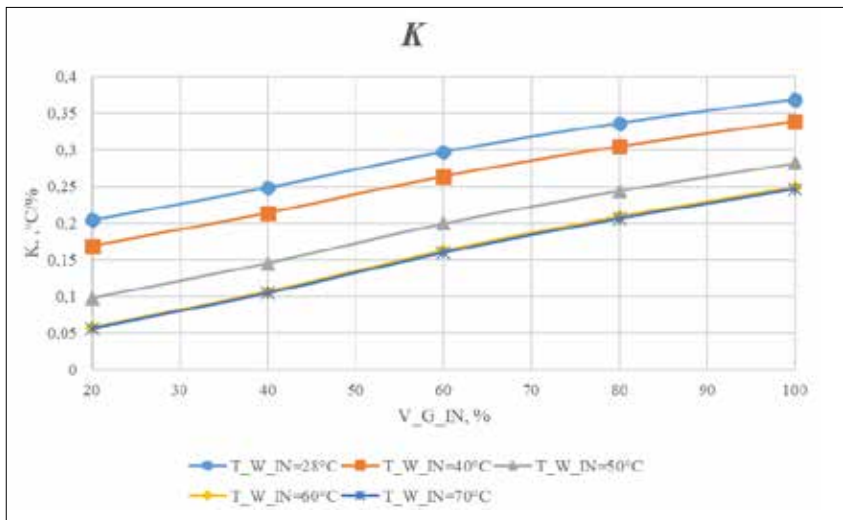


Рис. 15. Зміна коефіцієнта підсилення  $K$  у функції передачі за каналом “ $V_{G\_IN} \rightarrow T_{G\_OUT}$ ” в залежності від значень  $V_{G\_IN}$  та  $T_{W\_IN}$

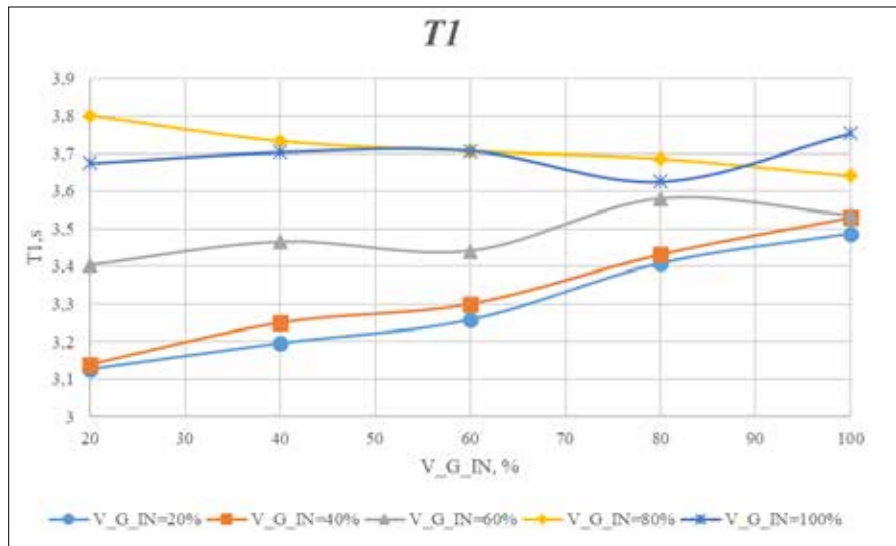


Рис. 16. Зміна сталої часу  $T1$  у функції передачі за каналом “ $V\_G\_IN \rightarrow T\_G\_OUT$ ” в залежності від значень  $V\_G\_IN$  та  $T\_W\_IN$

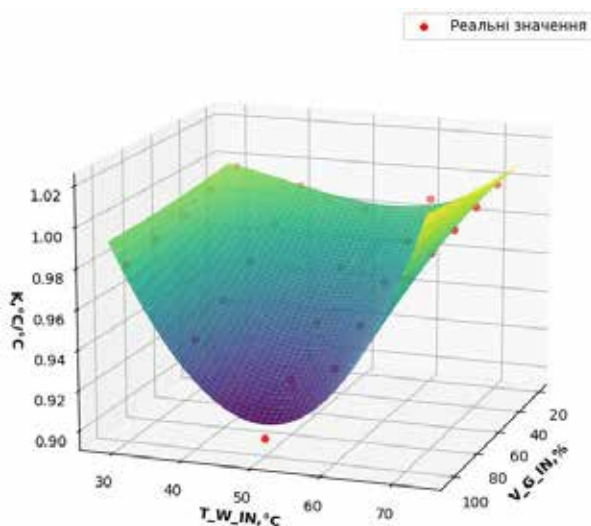


Рис. 17. Зміна сталої часу  $T2$  у функції передачі за каналом “ $V\_G\_IN \rightarrow T\_G\_OUT$ ” в залежності від значень  $V\_G\_IN$  та  $T\_W\_IN$

Параметри моделі перехідного процесу за каналом “ $V\_G\_IN \rightarrow T\_G\_OUT$ ” у вигляді інтегродиференціальної ланки наведено у формулі (8):

$$K = f(V\_G\_IN, T\_W\_IN) \quad (8)$$

$$T_1 = 3,5s$$

$$T_2 = 2,1s.$$

Після аналізу параметрів об’єкта управління на нелінійність можна зробити висновок, що деякі параметри функцій передач, що описують динаміку конденсаційного котла, є нелінійними. Тому вони мають бути змінними в залежності від режи-

мів роботи котла, а саме від температури теплоносія на вході у агрегат та витрати газу у топці.

#### Визначення залежностей для параметрів функцій передачі об’єкта керування

За каналом “ $T\_W\_IN \rightarrow T\_W\_OUT$ ”, де коефіцієнт підсилення  $K$  змінюється в залежності від  $V\_G\_IN$  та  $T\_W\_IN$ , було отримано залежність (9). На рисунку 18 наведено вигляд отриманої залежності.

$$K_{\langle T_{W_{IN}} \rightarrow T_{W_{OUT}} \rangle} = 0.003 \cdot V_{G_{IN}} + 0.007 \cdot y + 0.000001 \cdot V_{G_{IN}}^2 - 0.0002 \cdot V_{G_{IN}} \cdot T_{W_{IN}} - 0.0002 \cdot T_{W_{IN}}^2 - 0.000000001 \cdot V_{G_{IN}}^3 - 0.000000003 \cdot V_{G_{IN}}^2 \cdot T_{W_{IN}} + 0.000002 \cdot V_{G_{IN}} \cdot T_{W_{IN}}^2 + 0.000001 \cdot T_{W_{IN}}^3 + 0.901. \quad (9)$$

За каналом “ $T\_W\_IN \rightarrow T\_G\_OUT$ ”, де коефіцієнт підсилення  $K$  та час чистого транспортного запізнення  $\tau$  змінюються в залежності від  $V\_G\_IN$  та  $T\_W\_IN$ , було отримано залежності (10) та (11) відповідно, на рисунках 19 та 20 наведено відповідні залежності.

$$K_{\langle T_{W_{IN}} \rightarrow T_{G_{OUT}} \rangle} = 0.025 \cdot V_{G_{IN}} + 0.05 \cdot T_{W_{IN}} + 0.000002 \cdot V_{G_{IN}}^2 - 0.0012 \cdot V_{G_{IN}} \cdot T_{W_{IN}} - 0.001 \cdot T_{W_{IN}}^2 - 0.000000009 \cdot V_{G_{IN}}^3 - 0.000000004 \cdot V_{G_{IN}}^2 \cdot T_{W_{IN}} + 0.00001 \cdot V_{G_{IN}} \cdot T_{W_{IN}}^2 + 0.000008 \cdot T_{W_{IN}}^3 + 0.29263. \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \tau_{\langle T_{W\_IN} \rightarrow T_{G\_OUT} \rangle} = & 0.037 \cdot V_{G\_IN} - 6.8 \cdot T_{W\_IN} - 0.0006 \cdot V_{G\_IN}^2 - \\ & - 0.0027 \cdot V_{G\_IN} \cdot T_{W\_IN} + 0.22 \cdot T_{W\_IN}^2 - 0.000003 \cdot V_{G\_IN}^3 + \\ & + 0.00003 \cdot V_{G\_IN} \cdot T_{W\_IN} + 0.00007 \cdot V_{G\_IN} \cdot T_{W\_IN}^2 - 0.003 \cdot T_{W\_IN}^3 + \\ & + 0.00000001 \cdot V_{G\_IN}^4 + 0.00000002 \cdot V_{G\_IN}^3 \cdot T_{W\_IN} - \\ & - 0.0000004 \cdot V_{G\_IN}^2 \cdot T_{W\_IN}^2 - 0.0000005 \cdot V_{G\_IN} \cdot T_{W\_IN}^3 + \\ & + 0.00002 \cdot T_{W\_IN}^4 + 76.42. \end{aligned} \quad (11)$$

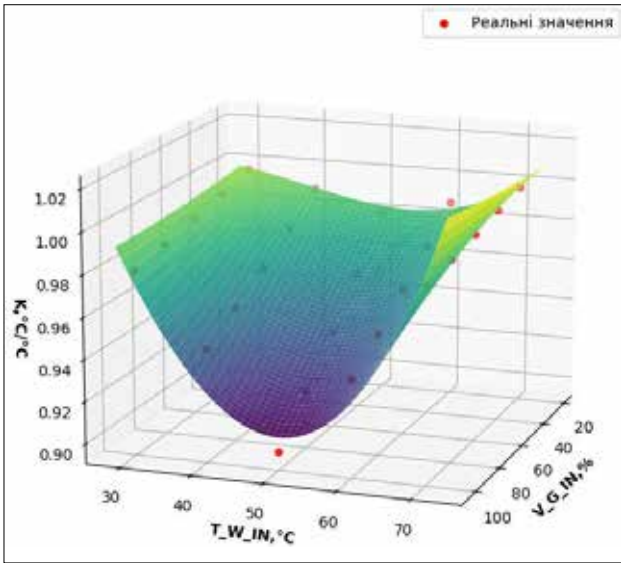


Рис. 18. Залежність коефіцієнт підсилення К функції передачі за каналом “T\_W\_IN→T\_W\_OUT” від V\_G\_IN та T\_W\_IN

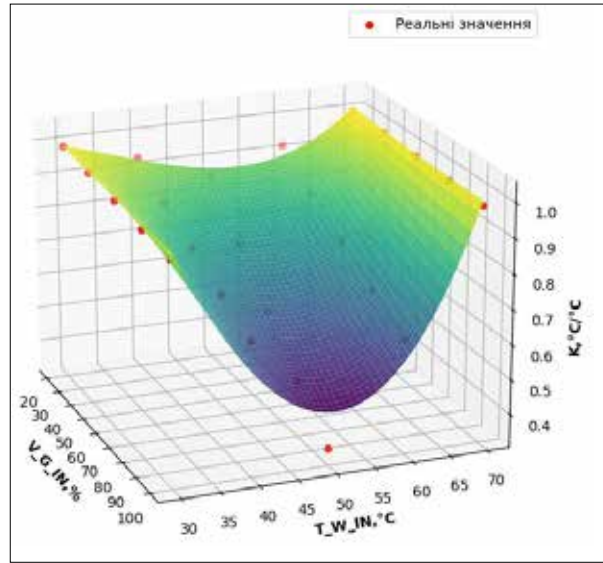


Рис. 19. Залежність коефіцієнт підсилення К функції передачі за каналом “T\_W\_IN→T\_G\_OUT” від V\_G\_IN та T\_W\_IN

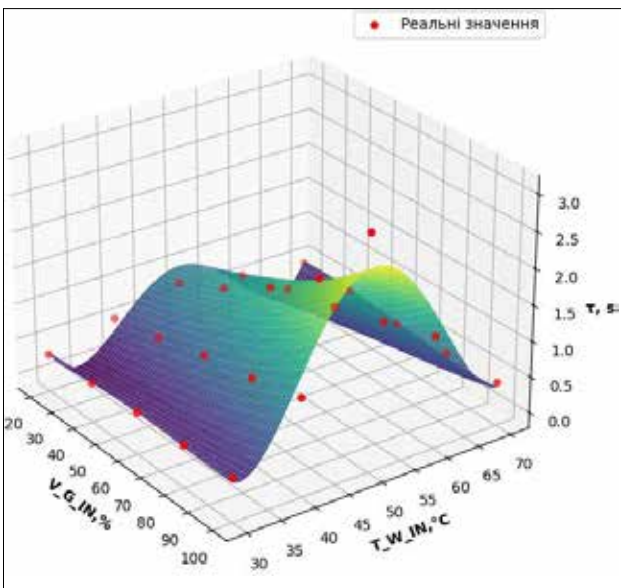


Рис. 20. Залежність часу чистого транспортного запізнення  $\tau$  функції передачі за каналом “T\_W\_IN→T\_G\_OUT” від V\_G\_IN та T\_W\_IN

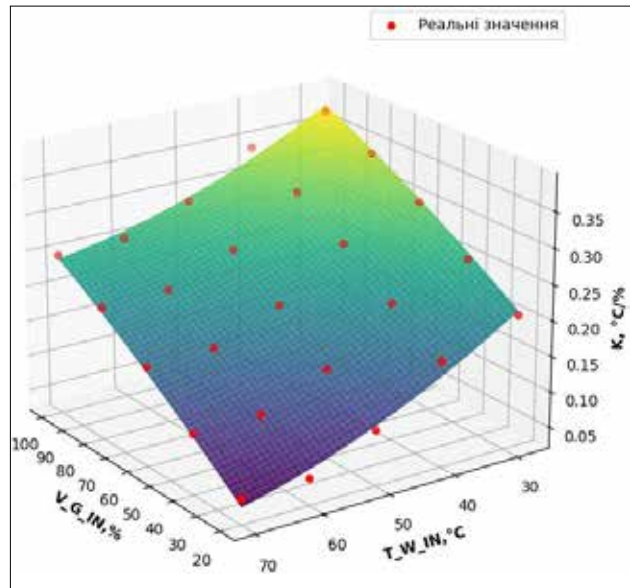


Рис. 21. Залежність коефіцієнт підсилення К функції передачі за каналом “V\_G\_IN→T\_G\_OUT” від V\_G\_IN та T\_W\_IN

За каналом “V\_G\_IN→T\_G\_OUT”, де коефіцієнт підсилення  $K$  змінюється в залежності від V\_G\_IN та T\_W\_IN, було отримано залежність (12). На рисунку 21 наведено вигляд отриманої залежності.

$$K_{\text{«V}_{G_{IN}} \rightarrow T_{G_{OUT}}\text{»}} = 0.0025 \cdot V_{G_{IN}} - 0.008 \cdot T_{W_{IN}} - 0.000005 \cdot V_{G_{IN}}^2 + 0.000009 \cdot V_{G_{IN}} \cdot T_{W_{IN}} + 0.00004 \cdot T_{W_{IN}}^2 + 0.362. \quad (12)$$

**Подальші перспективи отриманих наукових результатів**

Багато дослідників сходяться на думці, що призначення цифрових двійників – відобразити фізичний компонент кібер-фізичної системи, отримуючи від нього дані, обробляючи їх та формуючи зворотний зв’язок для оптимізації роботи об’єкта. Це визначає моделювання та обробку даних як ключові технології, необхідні для побудови та супроводу цифрового двійника.

Концепція цифрового двійника в контексті оцінювання якості функціонування обладнання по ключових показниках ефективності застосована для моніторингу та аналізу даних у реальному часі, забезпечуючи прогнозне обслуговування та адаптацію системи керування до умов роботи кожного екземпляра. Цифровий двійник системи теплозабезпечення (рис. 22) об’єднує історичні дані та дані в реальному часі, використовуючи моделювання для покращення процесу прийняття рішень. Також цифровий двійник забезпечує моніторинг, аналіз ефективності,

моделювання сценаріїв, виявлення несправностей і діагностику.

Для того, щоб представляти об’єкти реального світу в динаміці, екземпляри цифрового двійника повинні бути з’єднані з їхніми фізичними оригіналами, інколи в режимі реального часу, для збирання та упорядкування даних відповідних об’єктів реального світу. Для аналізу цих даних у цифровому двійнику мають бути розрахункові та аналітичні моделі, щоб описувати, діагностувати, прогнозувати та симулювати стани та поведінку реальних об’єктів і систем. Висновки, отримані в результаті такого аналізу, можуть бути поєднані із бізнес-логікою та цілями для оптимізації виробничих процесів.

**Висновки.** Розроблено експериментальну математичну модель конденсаційного котла у вигляді функції передачі. Отримана математична модель охоплює усі режими роботи котлоагрегату. Проаналізовано параметри моделі на нелінійність в залежності від діапазону вхідних значень. В основному нелінійними є коефіцієнти підсилення передатних функцій, які змінюються в залежності від значень вхідних параметрів на 10 %–80 %, що продемонстровано на відповідних графіках. Для нелінійних параметрів моделі було знайдено залежності, за допомогою яких можна визначити їх значення при різних вхідних параметрах конденсаційного котла. Отримані залежності це поліноми 2-го, 3-го та 4-го порядку від двох змінних: температури води на вході до котлоагрегату та витрати палива у конденсаційному котлі. Отримана експериментальна математична модель є основою для побудови цифрового двійника конденсаційного котла.

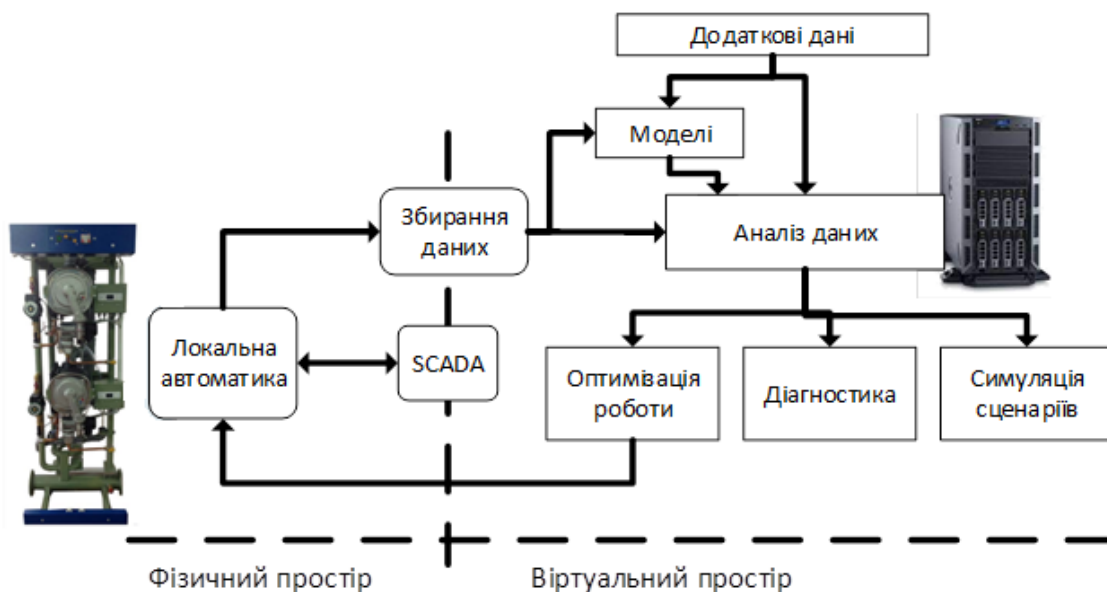


Рис. 22. Структурна схема цифрового двійника конденсаційного котла



Список літератури:

1. Патон Б. Є., Долінський А. А., Геєць В. М., Кухар В. П., Басок Б. І., Базєєв Є. Т., Подолець Р. З. Пріоритети Національної стратегії теплозабезпечення населених пунктів України. *Вісник НАН України*. 2014. № 9. С. 29–47.
2. Harish Satyavada, Simone Baldi. Monitoring energy efficiency of condensing boilers via hybrid first-principle modelling and estimation. *Energy*, Volume 142, 2018, p. 121-129 <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.124>
3. João Barros, Condenser boiler modeling. URL: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395144950949/resumo.pdf> (Дата звернення: 22.04.2024).
4. Куделя П. П., Барабаш П. А. Тепловой баланс конденсационных котлов. *Енергетика*. 2014. № 1. С. 51–59. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/eete\\_2014\\_1\\_9](http://nbuv.gov.ua/UJRN/eete_2014_1_9) (Дата звернення: 22.04.2024)
5. Malakuti Somayeh, Van Schalkwyk Pieter, Boss Birgit, Sastry Chellury, Runkana Venkataramana, Lin Shi-Wan, Rix Simon, Green Gavin, Baechle Kilian, Nath Shyam. Digital Twins for Industrial Applications. Definition, Business Values, Design Aspects, Standards and Use Cases. *An Industrial Internet Consortium White Paper*. Version 1.0. 2020.
6. Harish Satyavada, Simone Baldi. A Novel Modelling Approach for Condensing Boilers Based on Hybrid Dynamical Systems. Delft Center for Systems and Control. *Delft University of Technology*. 2016.
7. Dan Teodor Bălănescu, Vlad Mario. Homutescu Experimental investigation on performance of a condensing boiler and economic evaluation in real operating conditions. *Applied Thermal Engineering*. 2018. Volume 143. P. 48–58. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.082>
8. Hanby, V. I. Modelling the performance of condensing boilers. *Journal of the Energy Inst.* 2007. № 80. p. 229–231.
9. Дубовой В. М. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів і систем керування : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2012. 308 с.
10. Кубрак А. І., Жученко А. І., Кваско М. З. Комп'ютерне моделювання та ідентифікація автоматичних систем. Київ: Політехніка, 2004. 424 с.
11. Жученко А. І. Ідентифікація динамічних характеристик. Комп'ютерні методи. Київ, 2000. 182 с. URL: [http://opac.kpi.ua/F/?func=direct&doc\\_number=000066839&local\\_base=KPI01](http://opac.kpi.ua/F/?func=direct&doc_number=000066839&local_base=KPI01) (дата звернення: 22.04.2024).
12. Юзвак С.В., Шемчук В.В., Самарін С.В., Косулько А.Г., Ляхно В.Г. Модульні котельні установки системи «УКРІНТЕРМ». Довідковий посібник (12-е вид.). УКРІНТЕРМ. Біла Церква, 2019. 171 с.

**Kuchynska K.A., Novikov P.V., Voloshchuk V.A., Stepanets O.V.**  
**EXPERIMENTAL MATHEMATICAL MODEL OF A CONDENSING BOILER  
FOR DIGITAL TWIN DEVELOPMENT**

*The article presents an analysis of the dynamic characteristics of a condensing boiler during operation under all possible operating modes. The objective of the article is to obtain a mathematical model of the condensing boiler as a control object, which takes into account parameter variations depending on the operating mode. The obtained model is planned to be used for the construction of a digital twin of the condensing boiler in the control system and for analysing the equipment's performance efficiency. The article provides a structural diagram of the components of the investigated condensing boiler's digital twin. The article includes an analysis of recent research and publications related to the development of mathematical models for condensing boilers. A description of the technological scheme of the modular condensing boiler is provided. Furthermore, a diagram illustrating the input-output relationships of the technological control object is constructed. Mathematical models in the form of transfer functions have been developed based on experimental data that reflect the boiler's operation across its entire operating range. The accuracy of the obtained models has been assessed using the root mean square criterion. An analysis of the model parameters for nonlinearity has been conducted with respect to the operating mode of the research object. It has been observed that certain parameters of the model, such as gain coefficients and time delays, exhibit significant variations depending on the boiler's operating mode, while other parameters are practically independent of the operating mode. Mathematical dependencies describing the variation of these parameters based on the input variables have been determined for the parameters of the model that depend on the operating mode of the condensing boiler. These dependencies are presented in the form of equations and spatial surfaces for graphical representation. The developed condensing boiler model will be used for the development of a digital twin of the condensing boiler. The structure of the digital twin of the investigated condensing boiler is provided, along with the functions of its components within the system.*

**Key words:** condensing boiler, dynamic characteristics, analysis of parameter nonlinearity, digital twin, modelling, mathematical model.

**Марчук Г.В.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

**Любченко Д.В.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

## ГЕНЕРАЦІЯ ЛАБІРИНТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ АЛГОРИТМУ HUNT AND KILL

*У статті досліджується алгоритм Hunt and Kill, що використовується для генерації випадкових лабіринтів. Тема генерації лабіринтів є актуальною для дослідників протягом багатьох років. Існує кілька популярних алгоритмів, таких як алгоритм Прима, Крускала, алгоритми глибинного пошуку. Усі ці методи мають свої переваги та недоліки, і вибір конкретного методу залежить від вимог до кінцевого продукту. Наукові роботи з цієї тематики зосереджені на оптимізації часу генерації, зменшенні використання пам'яті та покращенні якості генерованих лабіринтів. Дане дослідження ставить за мету провести комплексне вивчення алгоритму Hunt and Kill, висвітлюючи його сильні та слабкі сторони. У роботі з'ясовано, що алгоритм Hunt and Kill, на відміну від багатьох інших, дозволяє створювати лабіринти з менш передбачуваною структурою, що підвищує цікавість та складність його проходження.*

*Дослідження алгоритму Hunt and Kill, який генерує лабіринти шляхом прокладання випадкових шляхів через сітку та видалення стін, виявило, що його продуктивність залежить від двох ключових факторів – це розмір лабіринту і щільність стін. Чим більший лабіринт, тим довше буде проходити його генерація. Чим вища щільність стін, тим складніше алгоритму генерації знаходити вільні проходи та створювати лабіринт з багатьма тупиками. Це також збільшує час генерації. До факторів які можуть вплинути на продуктивність алгоритму може бути і його реалізація. Для генерації лабіринтів великого розміру доцільніше використовувати більш ефективні алгоритми. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на оптимізацію алгоритму для покращення його продуктивності. Оптимізація алгоритму може зробити його ще більш корисним для широкого кола задач. Загалом, Hunt and Kill – це цінний інструмент для створення лабіринтів, який має як сильні, так і слабкі сторони.*

**Ключові слова:** лабіринт, генерація, алгоритм, Hunt and kill, складність, пошук шляху.

**Постановка проблеми.** Генерація лабіринтів є важливою задачею в різних галузях, таких як ігровий дизайн, робототехніка, штучний інтелект та комп'ютерна графіка. Вона вимагає ефективних алгоритмів, здатних створювати складні, але проходжувані структури, які можуть бути використані в іграх, симуляціях або навчальних системах. Одним із таких алгоритмів є Hunt and Kill, який базується на поєднанні випадкового блукання та систематичного пошуку. Однак, попри його потенційні переваги, алгоритм Hunt and Kill залишається недостатньо дослідженим в аспекті його ефективності, складності та варіативності генерованих лабіринтів. Існує потреба в більш детальному аналізі цього алгоритму, зокрема, в контексті його порівняння з іншими популярними алгоритмами генерації лабіринтів, такими як Алгоритм Крускала, Алгоритм Прима та Алгоритм глибини-першого пошуку.

Таким чином, головною проблемою, яка потребує вирішення, є розробка та аналіз мето-

дів ефективної генерації лабіринтів за допомогою алгоритму Hunt and Kill, з метою виявлення його сильних і слабких сторін, а також можливостей для оптимізації та застосування в різних практичних задачах. Це включає дослідження аспектів, пов'язаних з якістю згенерованих лабіринтів, швидкістю виконання алгоритму та його адаптивністю до різних вимог користувачів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

У розробці відеоігор створення карт, ворогів і багатьох інших елементів ігрових рівнів є одним із важливих процесів. Щоб покращити ігровий досвід гравців, розробники ігор повинні розуміти поведінкові тенденції гравців і відповідно створювати рівні. У статті [1] проведено порівняння алгоритмів генерації лабіринтів. Проаналізовано їх природу та визначено найкращі з них. Досліджено алгоритми Прима, Крускала, DFS (Depth First Search), Еллерса, Вілсона, Hunt and Kill та алгоритм Альдуса-Бродера. Оцінка ефективності алгоритмів визначається двома параметрами:

часом, необхідним алгоритму для генерації лабіринту, і просторовою складністю лабіринту. Оцінки проводяться на основі кількості змінних, включаючи кількість перехресть і тупиків, разом із загальною кількістю кроків, зроблених агентами, щоб визначити, наскільки складним є лабіринт для навігації.

Лабіринти як проблемна область мають широке застосування, від мистецтва та ігор до тестування алгоритмів прийняття рішень. Хоча дослідження генерування лабіринтів традиційно зосереджувалося на топології, останнім часом з'явилося більше робіт, які досліджують генерацію лабіринтів з різним рівнем складності. У статті [2] досліджується метод генерації лабіринтів певної складності за допомогою нейронної мережі, параметризованого алгоритму генерації лабіринту та моделі складності.

У статті [3] проведено дослідження ранжування різних алгоритмів генерації лабіринтів за складністю згенерованих лабіринтів. В результаті було визначено, що найкращі алгоритми є похідними від алгоритмів пошуку рівномірних остовних дерев у графах.

Ідеальний лабіринт – це лабіринт, у якому будь-які дві клітини можна з'єднати унікальним шляхом. У літературі існує одинадцять алгоритмів генерації лабіринтів, зібраних Баком у 2015 році в його книзі «Лабіринти для програмістів». Кожен алгоритм створює лабіринти по-різному. Метою дослідження [4] було аналіз створення ідеального лабіринту. Дослідники запропонували два нових алгоритми генерації лабіринту, які називаються Prim and Kill і Twist end Merge. Ці два алгоритми генерують лабіринти інакше, ніж існуючі алгоритми.

У документі [5] описано реалізацію технології штучного інтелекту, відомої як генетичний алгоритм, яка використовується для вирішення випадково згенерованих лабіринтів різного розміру та складності. Щоб оцінити ефективність генетичного алгоритму, реалізовано декілька методів, не пов'язаних зі штучним інтелектом, наприклад пошук у глибину, пошук у ширину, алгоритм A-Star, алгоритм Дейкстри і Greedy.

У статті [6] наведено огляд трьох основних алгоритмів генерації двовимірних лабіринтів пошук у глибину (DFS), алгоритм Крускала та алгоритм Прима. Ці алгоритми описують три концептуально різні підходи до створення лабіринтів.

Алгоритми створення лабіринтів відіграють значну роль у відеоіграх з лабіринтами. Більшість існуючих методів спрямовані на підвищення про-

дуктивності алгоритмів створення нерівномірного лабіринту. Однак створення різних лабіринтів з однаковою ймовірністю за допомогою єдиних алгоритмів має вирішальне значення для покращення ігрового досвіду користувача. У статті [7] досліджується розробка гібриду двох однотипних алгоритмів генерації лабіринтів, Олдоса-Бродера та Вілсона, чергуючи їх на деякій критичній фазі роботи, щоб зменшити час виконання.

У документі [8] представлено метод, який генерує бажаний лабіринт, коли користувачі надають потрібні властивості. У методі використовується підхід процедурного створення вмісту на основі пошуку (search-based procedural content generation, SBPCG), у якому процес неодноразово генерує та перевіряє лабіринти, щоб отримати задовільний лабіринт

**Постановка завдання.** Метою статті є дослідження алгоритму Hunt and Kill та його реалізація. Це включає детальне проектування алгоритму, реалізацію у вигляді програмного коду та тестування на предмет якості та ефективності згенерованих лабіринтів.

**Виклад основного матеріалу.** Алгоритм Hunt and Kill – це простий та ефективний алгоритм для створення лабіринтів. Він працює шляхом випадкового блукання по сітці та видалення стін, щоб створити проходи.

Алгоритм Hunt and Kill складається з двох основних етапів: режиму полювання (hunt) та режиму вбивства (kill). Для опису алгоритму використаємо наступні математичні позначення:

- $M$  – матриця лабіринту розміром  $n \times m$ .
- $V$  – множина відвіданих клітинок.
- $C(i,j)$  – клітинка лабіринту на позиції  $(i,j)$ .
- $N(i,j)$  – множина сусідніх клітинок для  $C(i,j)$ .

Етапи роботи алгоритму Hunt and Kill:

1. Ініціалізація. Обираємо випадкову клітинку  $C(i,j)$  та додаємо її до  $V$ .

2. Режим вбивства (Kill):

– Випадково обираємо сусідню клітинку  $C(i',j')$  з  $N(i,j)$ , яка ще не відвідана.

– Додаємо  $C(i',j')$  до  $V$  та видаляємо стіну між  $C(i,j)$  та  $C(i',j')$ .

– Повторюємо, поки всі сусідні клітинки не будуть відвідані.

3. Режим полювання (Hunt):

– Проходимо по всій матриці, поки не знайдемо не відвідану клітинку  $C(i',j')$ , яка має відвіданого сусіда  $C(i'',j'')$ .

– Додаємо  $C(i',j')$  до  $V$  та видаляємо стіну між  $C(i',j')$  та  $C(i'',j'')$ .

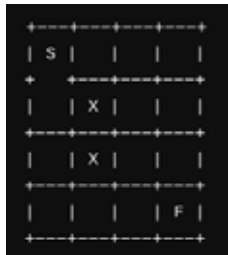


Рис. 1. Графічне представлення алгоритму Hunt and Kill

Повертаємося до режиму вбивства.

На рисунку 1 зображено матриця алгоритму Hunt and Kill, де S – початкова клітинка; F – Кінцева клітинка; X – Поточна позиція в режимі вбивства; +---+ – Стінки клітинок; - | – Відвідана клітинка без стіни.

На рисунку 2 наведено алгоритм побудови лабіринту за допомогою методу Hunt And Kill (НАК).

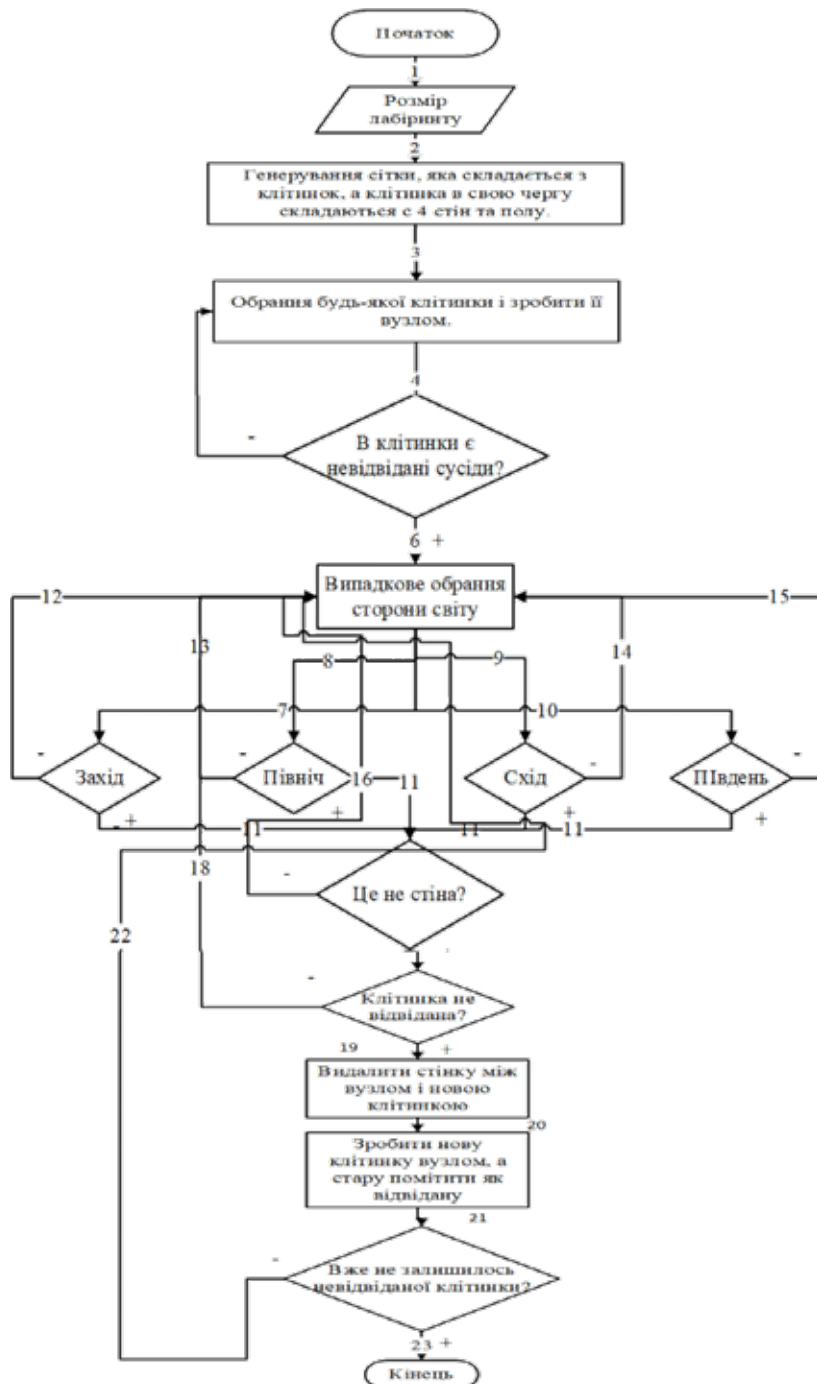


Рис. 2. Алгоритм побудови лабіринту Hunt And Kill

Початок роботи алгоритму починається одразу після передачі розміру лабіринту (1). Після відбувається генерація сітки (2). Після того як сітка буде сформована, алгоритм обирає будь-яку точку і робить її вузлом, тобто головною, а також помічає, що ця клітинка є відвіданою (3). Але для того, щоб йти далі, треба спочатку перевірити, чи сусіди клітинки є невідвіданими (4). Якщо є, то треба випадково обрати одну із чотирьох сторін світу (6) і перевірити, чи обрана (7–10) сторона не є граничною стіною (11). Стіна – це границя лабіринту, її не можна рушити, так як це призведе до некоректної побудови лабіринту і до помилок. Після того як перевірили, треба зробити ще одну перевірку (17), а саме: чи обрана клітинка не відвідана; якщо ні то

ця клітинка остаточно підходить (19), щоб стати продовженням майбутнього лабіринту. Обравши клітинку рушимо стінку (20) між вузлом (головна клітинка, звідки ми перейшли до нової) і обраної клітинки. Після того як стіна була знищена, ту клітинку, яку попередньо обрали робимо головним вузлом (21). Перероблюємо всі попередні дії до того моменту, поки вузол не «зажине себе в глухий кут» і йому не буде куди йти. При такій ситуації треба обрати новий вузол із тих, що залишились не відвіданими і пророблювати всі ці дії до того часу, поки не залишиться невідвіданих клітинок (23). Після чого лабіринт буде повністю побудованим. Якщо якась клітинка не буде підходити то завжди буде обиратися нова клітинка (12–18).

Лістинг коду:

```
private void HuntAndKill() {
    mazeCells [currentRow, currentColumn].visited = true;
    while (!courseComplete) {
        Kill();
        Hunt();
    }
}

private void Kill() {
    while (RouteStillAvailable (currentRow, currentColumn)) {
        int direction = Random.Range (1, 5);
        if (direction == 1 && CellIsAvailable (currentRow - 1,
currentColumn)) {
            DestroyWallIfItExists (mazeCells [currentRow,
currentColumn].northWall);
            DestroyWallIfItExists (mazeCells [currentRow - 1,
currentColumn].southWall);
            currentRow--;
        } else if (direction == 2 && CellIsAvailable (currentRow + 1,
currentColumn)) {
            DestroyWallIfItExists (mazeCells
[currentRow, currentColumn].southWall);
            DestroyWallIfItExists (mazeCells [currentRow + 1,
currentColumn].northWall);
            currentRow++;
        } else if (direction == 3 && CellIsAvailable (currentRow,
currentColumn + 1)) {
            DestroyWallIfItExists (mazeCells [currentRow,
currentColumn].eastWall);
            DestroyWallIfItExists (mazeCells [currentRow, currentColumn +
1].westWall);
            currentColumn++;
        } else if (direction == 4 && CellIsAvailable (currentRow,
currentColumn - 1)) {
            DestroyWallIfItExists (mazeCells
[currentRow, currentColumn].westWall);
            DestroyWallIfItExists (mazeCells [currentRow, currentColumn -
1].eastWall);
            currentColumn--;
        }
        mazeCells [currentRow, currentColumn].visited = true;
    }
}

private void Hunt() {
    courseComplete = true;

    for (int r = 0; r < mazeRows; r++) {
        for (int c = 0; c < mazeColumns; c++) {
            if (!mazeCells [r, c].visited &&
CellHasAnAdjacentVisitedCell(r,c)) {
                courseComplete = false;
                currentRow = r;
                currentColumn = c;
                DestroyAdjacentWall (currentRow, currentColumn);
                mazeCells [currentRow, currentColumn].visited = true;
                return;
            }
        }
    }
}
```

Таблиця 1

**Результати генерації лабіринтів на Apple Macbook Air M1**

| Час виконання генерації лабіринту в залежності від розміру (в мілісекундах) |       |         |         |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------|---------|---------|
| 10×10                                                                       | 55×55 | 100×100 | 500×500 |
| 0.25                                                                        | 1.5   | 7.0     | 75.0    |
| 0.30                                                                        | 2.0   | 8.5     | 80.0    |
| 0.28                                                                        | 1.8   | 7.5     | 78.0    |
| 0.27                                                                        | 1.7   | 6.8     | 76.5    |
| 0.26                                                                        | 1.9   | 7.2     | 77.5    |

Алгоритм Hunt and Kill – це алгоритм генерування лабіринтів, який належить до категорії алгоритмів випадкового вибору.

Часова складність алгоритму Hunt and Kill залежить від кількості ітерацій, необхідних для створення лабіринту. В середньому алгоритму потрібно пройти через кожну клітинку лабіринту один раз. В найгіршому випадку алгоритму може знадобитися пройти через кожну клітинку лабіринту кілька разів.

Просторова складність алгоритму Hunt and Kill залежить від кількості пам'яті, необхідної для зберігання інформації про лабіринт.

В таблиці 1 наведено результати дослідження роботи алгоритму Hunt and Kill

За результатами дослідження можна зробити висновки:

- Збільшення розміру лабіринту призводить до значного збільшення часу виконання.
- Час виконання не є лінійно-пропорційним розміру лабіринту.
- Найбільш значне збільшення часу виконання спостерігається при переході від 100×100 до 500×500 лабіринтів.

**Висновки.** Алгоритм Hunt and Kill є ефективним методом генерації лабіринтів, особливо у випадках, коли необхідно створити складні та непередбачувані структури. Основні переваги цього алгоритму полягають у його простоті реалізації та можливості створювати лабіринти з високим рівнем випадковості. Недоліками є потенційно довгий час виконання при великих розмірах лабіринту. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на оптимізацію режиму роботи та зменшення витрат ресурсів.

**Список літератури:**

1. Mane, Deepak, et al. An Extensive Comparative Analysis on Different Maze Generation Algorithms. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering* 12.2s (2024): 37–47.
2. Fujihira, Keita, Chu-Hsuan Hsueh, and Kokolo Ikeda. Procedural Maze Generation Considering Difficulty from Human Players' Perspectives. *Advances in Computer Games*. Cham: Springer International Publishing, 2021. 165–175
3. Gabrovsek, Peter. Analysis of maze generating algorithms. *IPSI Transactions on Internet Research* 15.1 (2019): 23–30.
4. Bellot, Victor, et al. How to generate perfect mazes? *Information Sciences* 572 (2021): 444–459. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2021.03.022>
5. Sagming, M. N., Reolyn Heymann, and E. Hurwitz. Visualising and solving a maze using an artificial intelligence technique. *2019 IEEE AFRICON*. IEEE, 2019.
6. Shah, Ms Shivani H., et al. "Survey paper on maze generation algorithms for puzzle solving games." *International Journal of Scientific & Engineering Research* 8.2 (2017): 1064–1067.
7. Zhao, Guangxin, Hao Gu, and Emma Cai. A hybrid approach to maze generation algorithms. *International Conference on Algorithms, High Performance Computing, and Artificial Intelligence (AHPCAI 2023)*. Vol. 12941. SPIE, 2023.
8. Simonyan, Ernest, Olga Medvedeva, and Sergey Medvedev. The Reverse Approach for Generating Maze With Unique Characteristics. *2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*. IEEE, 2020.

**Marchuk G.V., Liubchenko D.V. GENERATION OF MAZES USING THE HUNT-AND-KILL ALGORITHM**

*The article examines the Hunt and Kill algorithm used for generating random mazes. The topic of maze generation has been relevant to researchers for many years. There are several popular algorithms, such as Prim's, Kruskal, and depth-first search algorithms. Each method has advantages and disadvantages, and the choice of a specific method depends on the requirements for the final product. Scientific papers focus on optimizing generation time, reducing memory usage, and improving the quality of generated mazes. This study aims to comprehensively examine the Hunt and Kill algorithm, highlighting its strengths and weaknesses.*

*The study found that, unlike many others, the Hunt and Kill algorithm allows for creating mazes with less predictable structures, increasing the interest and difficulty of navigating through them. The investigation of the Hunt and Kill algorithm, which generates mazes by carving random paths through a grid and removing walls, revealed that its performance depends on two key factors – the size of the maze and the wall density. The more giant the maze, the longer the generation will take. The higher the wall density, the more challenging it is for the algorithm to find open passages and create a maze with many dead ends, increasing generation time. Factors that can influence the algorithm's performance include its implementation. For generating giant mazes, it is more appropriate to use more efficient algorithms.*

*Further research may focus on optimizing the algorithm to improve its performance. Optimization could make the algorithm even more helpful for many tasks. Overall, Hunt and Kill is a valuable tool for creating mazes with strengths and weaknesses.*

**Key words:** maze, generation, algorithm, Hunt and Kill, complexity, pathfinding.

**Мойсеєнко О.В.**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

## ПРОГНОЗУВАННЯ КІБЕРАТАК НА ОСНОВІ МОНІТОРИНГУ ІНТЕНСИВНОСТІ ТРАФІКУ В КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ

*Численні дослідження мережевих аномалій або інтрузивних мережевих подій не дозволяють розв'язати деякі задачі безпеки мереж. Дослідницькі проблеми все ще залишаються невирішеними через мінливість шаблонів мережевого трафіку та сценаріїв вторгнень. У роботі здійснено аналіз даних мережевого трафіку для виявлення підозрілих мережевих дій (тобто вторгнень) за допомогою методів прогнозування часових рядів. У цьому дослідженні представлено підхід до прогнозування частот мережевих подій (типових і несанкціонованих) шляхом створення моделей прогнозу та оцінки ризиків атак. Вейвлет функції використані для визначення погодинних змін подій у мережі та визначення частоти подій у мережі, різка зміна якої може бути маркером несанкціонованих дій в мережі. Для прогнозування майбутніх подій мережевого трафіку використовується метод багатовимірних часових рядів, векторна автоматична регресія з екзогенними змінними (VARX). Ризики атак для мережевих подій оцінюються за допомогою адаптивного порогового методу та оцінюються шляхом виконання класифікації за допомогою двох методів машинного навчання. Проведено порівняльну оцінку між різними часовими шкалами (одна секунда, п'ять секунд і п'ятнадцять секунд) і трьома вейвлетами у визначенні ризиків атаки. Моделі з VARX демонструють можливість аналізу багатовимірних даних часових рядів мережевого трафіку для прогнозування майбутніх мережевих подій і оцінки ризиків їх атак. Доведено ефективність запропонованої нами моделі прогнозування для прогнозування частоти мережевих подій на одну годину вперед. Під час оцінки частоти нормальних подій в мережі не спостерігалось суттєвої різниці в продуктивності з точки зору точності прогнозування. Подібні результати були отримані при оцінці передбачуваних частот атак з трьома різними часовими масштабами.*

**Ключові слова:** пастка для хакерів, багатовимірний аналіз часових рядів, оцінка ризику атаки, Noneurrot, вейвлет-перетворення, вторгнення в мережу.

**Постановка проблеми.** DDoS-епідемія залишається серйозною проблемою для компаній в усьому світі. Дослідники журналу Cybersecurity Ventures прогнозують щорічну глобальну шкоду від кіберзлочинності 10.5 трильйонів доларів до 2025 року. Хакери атакують як великі проекти, так і маловідомі сайти. Причини різні: від випадковості, коли зловмисники тренують свої сили перед масштабним нападом, до цілеспрямованих зловмисних дій з метою вивести з ладу конкретний веб-ресурс.

Моніторинг і прогнозування мережевих подій є обов'язковими для встановлення вторгнень в мережу, а також щоб зрозуміти майбутні тенденції атак. Аналіз мережевого трафіку становить особливу проблему через постійну зміну природи мережевої діяльності в часі. Аналіз часових рядів може відігравати важливу роль у визначенні важливих атрибутів атак під час перевірки мережевої діяльності. Однак він може бути непридатним для безпосереднього аналізу даних мережевого трафіку, враховуючи, що події мережевого трафіку зазвичай відбуваються як серія послідовних спостережень у межах однієї часової позначки. При

цьому моніторинг раптових змін у мережі з пливом часу може слугувати ключовою характеристикою для виявлення подій атаки.

У сучасних мережевих середовищах за лічені секунди генерується величезна кількість мережевих подій. Отже, задачі аналізу мережевих подій вимагають значних зусиль, особливо при роботі з великою кількістю мережевих змінних.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Наразі запропоновано кілька підходів для моніторингу та виявлення підозрілих або втручальних дій у мережі. Однак точно визначити загрози все ще складно через різноманітні шаблони атак, які постійно змінюються. Останнім часом технологія обману (пастки) привертає все більше уваги завдяки можливості збору та аналізу різноманітних даних для розуміння моделей поведінки зловмисників. Система Noneurrot є широко використовуваною оманливою технікою [2–5] у безпеці мережі. Будучи обчислювальним середовищем-приманкою, воно спонукає зловмисників продемонструвати їхні моделі атак, методи та використовувані інструменти [6].



Існує багато досліджень, які використовували технологію обману для моніторингу подій у мережі та прогнозування можливих майбутніх атак. У [7] запропонували процес аналізу даних стохастичної кібератаки, отриманих у honeypot, із шкалою часу 1 хвилина. Також продемонстровано можливість застосування статистичних властивостей, довгострокової залежності (LRD), для виявлення кібератак із хорошою продуктивністю. У [8] представлено проактивну систему безпеки для прогнозування атак розподіленої відмови в обслуговуванні (DDoS). У [9] запропонували техніку прогнозування коливань (тобто збільшення/зменшення) подій атак за допомогою байєсівського висновку. У [10] описаний гібридний підхід прогнозування вторгнень із аналізом часових рядів, аналізом даних та імовірнісним моделюванням. Використане експоненціальне згладжування, кластеризацію та ланцюг Маркова для одночасної оцінки результатів і сповіщення, якщо більше ніж два методи визначають мережеві події як атаки.

Попри численні дослідження для виявлення мережевих аномалій або інтрузивних мережевих подій деякі дослідницькі проблеми все ще залишаються невирішеними через постійну зміну шаблонів мережевого трафіку та сценаріїв вторгнень, зокрема щодо виявлення мережевих аномалій при збереженні високої продуктивності та вдосконаленні можливостей виявлення атак шляхом розуміння моделей атак з часом. Зловмисники часто надсилають велику кількість мережевих підключень або кілька послідовних мережевих підключень, щоб вторгнутися в обчислювальні мережі. Таким чином, аналіз кожного мережевого підключення (тобто мережевої події) окремо може бути некорисним для виявлення втручання атакувальними діями. Для усунення цього обмеження надзвичайно важливим є розуміння варіацій шаблонів атак у часовій області. Однак аналіз часових рядів мережевих атак і моделей поведінки зловмисників широко не вивчався.

Попередні дослідження показали важливість прогнозування можливих майбутніх атак шляхом включення різних методів аналізу даних часових рядів, дослідження мають обмеження, які пов'язані з непроведенням аналізу повного спектру великомасштабних даних мережевого трафіку та різних часових масштабів.

Інші обмеження:

1) проведено недостатня кількість досліджень для прогнозування мережевих атак у мережі honeypot;

2) попередні дослідження використовували однофакторні змінні для прогнозування атак

без урахування частоти як звичайних подій, так і подій атаки з часом;

3) не було проведено дослідження для оцінки ризиків атак.

Щоб усунути ці обмеження, наш підхід зосереджений на оцінці ризиків атак за допомогою багатовимірних часових рядів шляхом аналізу даних за тривалий період часу.

**Постановка завдання.** Метою статті є дослідження застосування методів аналізу часових рядів для прогнозування мережевих подій, побудови моделей атак на основі досліджень та аналізу мережевого трафіку; а також визначення оцінки ризиків атак на основі частот нормальних та несанкціонованих мережевих подій у різних масштабах часу.

**Виклад основного матеріалу.** У мережевих середовищах набір упорядкованих за часом мережевих подій записується в певний час  $t_i$ . Ці дані утворюють часовий ряд – послідовність даних, що складається з послідовних вимірювань, зроблених протягом регулярного інтервалу часу. Аналіз часових рядів здійснює прогнозування рядів даних, які зазвичай не є детермінованими, тобто містять випадковий компонент. Тому аналіз часових рядів мережевих подій можна використовувати для характеристики поведінки атак. Авторегресія (AR), ковзне середнє (MA) та авторегресійне ковзне середнє (ARMA) – це методи, які зазвичай використовуються для аналізу різних типів даних часових рядів. У контексті виявлення вторгнень в [11] запровадили статистичну модель часових рядів, інтегровану в систему кіберзахисту. Вони використовували узагальнене авторегресійне ковзне середнє (GARMA), щоб передбачити частоту атак на години наперед.

Важливим є прогнозування можливих майбутніх атак, оскільки це може дати системним адміністраторам достатньо часу для підготовки до можливих атак шляхом зміни конфігурацій захисту. У деяких працях [12] здійснено аналіз часових рядів даних щодо мережевих атак, зібраних у приманках. Використано метод Бокса-Дженкінса для розробки прогнозних моделей для прогнозування атак. Встановлено, що модель AR(1) і початкове завантаження на основі моделі AR(1) може бути використано для прогнозування атак. Виявлено, що передбачувані атаки збігаються з реальними атаками з ймовірністю понад 95 %.

Формально часовий ряд може бути представлений як  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ , де  $S$  – часовий ряд,  $s_i$  – зареєстроване значення змінної  $S$  у момент часу  $t_i$ , а  $n$  – кількість спостережень.

Часові ряди мають деякі характеристики, які ускладнюють аналіз даних: великий об'єм, висока розмірність, ієрархія та багатовимірність.

Кількість спостережень у часовому ряді трафіку часто може бути надзвичайно високою, іноді коливатись від порядку сотень чи тисяч до порядку мільйонів чи мільярдів. Великий об'єм даних створює проблему для аналізу даних і алгоритмів інтелектуального аналізу, оскільки більші бази даних потребують більше часу для аналізу даних і методів інтелектуального аналізу для доступу до даних і виконання обчислень.

Висока розмірність є ще однією характеристикою даних часових рядів спостереження трафіку. Під час пошуку подібностей та аномалій під час аналізу даних часових рядів виникає проблема «прокляття розмірності», коли часовий ряд відображається на  $k$ -вимірному просторі, де  $k$  – кількість часових точок.

Іншою особливістю даних часових рядів є їх ієрархічний характер. Часовий ряд можна аналізувати за його основною часовою ієрархією.

Останньою характеристикою даних часових рядів є багатовимірний характер деяких даних. Аналіз даних часових рядів часто вивчає одну змінну, але іноді має справу з даними часових рядів, що складаються з кількох пов'язаних змінних.

Запропонований нами підхід до аналізу даних мережевого трафіку для виявлення атак складається з трьох основних частин.

1. Дані мережевого трафіку ( $D$ ) перетворюються на часовий ряд, масштабуються. Потім застосовуються виділення ознак часового ряду і вибір апроксимаційних функцій.

2. З обраними функціями генеруються моделі прогнозування мережевих подій.

3. За допомогою моделей оцінюються ризики атак.

*Етап перший: перетворення даних у масштабований часовий ряд, обчислення характеристик ряду та виділення апроксимаційних функцій.*

Так як багато подій в мережі відбуваються одночасно і проявляються як серія подій, то дані мережевого трафіку повинні бути перетворено на цільову шкалу часу з узгодженими часовими інтервалами. Існують різні підходи для цього перетворення, такі як агрегація або віднімання під час перетворення даних мережевого трафіку у формат часових рядів.

Ми пропонуємо здійснювати перетворювання у часовий ряд шляхом обчислення різниці між сумою та медіаною вхідних даних (тобто оригінальних даних) у кожній змінній у момент часу  $t$ .

Тобто, з цільовим масштабом часу ( $t_s$ ), усі відліки

$$\Omega^t = \{\omega^t_1, \omega^t_2, \dots, \omega^t_n\},$$

де  $\{\omega^t_i | \omega^t_i \subset D, t < D_{ts} \leq t + t_s\}$  у діапазоні часу ( $t \sim t + t_s$ ) вибираються з вхідних даних  $D$ , де  $D_{ts}$  вказує часову позначку події мережі, а  $\omega^t \cap \omega^{t+ts} = \emptyset$ .

З вибраними екземплярами нові дані часового ряду з цільовою шкалою часу

$$\Gamma = \{u^1, u^2, \dots, u^m\},$$

де  $m = \max(D_{ts})/t_s$ , обчислюються шляхом вимірювання різниць ( $\phi(\Omega^t)$ ).

$N^t$  вказує загальну кількість екземплярів у  $\Omega^t$ .

$$u^t = \frac{\phi(\Omega^t)}{N^t}.$$

Оскільки жодні дослідження не запропонували оптимальний часовий масштаб для аналізу мережевих подій, доцільно провести аналіз із різними часовими масштабами, щоб знайти оптимальний цільовий часовий масштаб для оцінки даних мережевого трафіку.

Після перетворення вхідних даних у масштабований часовий ряд ми будемо описувати функції за допомогою дискретного Вейвлет-перетворення (DWT), яке забезпечує збір інформації про час і частоту дискретного ряду на основі нескінченного набору можливих базових функцій (так званих вейвлетів). Коефіцієнти деталізації DWT відображають високочастотні компоненти. Загалом, коефіцієнти апроксимації використовуються для визначення основних тенденцій, тоді як коефіцієнти деталізації корисні для виявлення відхилень. З цієї причини коефіцієнти деталізації широко використовуються для виявлення будь-яких раптових змін.

*Техніка вибору ознак для детектування нормальних подій в мережі та атак.*

Наступним кроком необхідно вибрати ознаки часового ряду, які б дозволили б статистично значущо оцінити відмінність частот нормальних мережевих подій та атак.

Припустимо, що задана вихідна послідовність роботи мережі складається з серії спостережень часової послідовності  $O = \{(T_i, X_i, Y_i)\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$  містить події мережевого трафіку ( $N$  – загальна кількість подій).  $T$  позначає час,  $X$  позначає змінні вихідної послідовності мережевого трафіку з номінальними, дійсними числами та двійковими змінними, а  $Y \in \{\text{normal}, \text{attack}\}$  вказує на мережеві події.

Дані часових рядів створюються шляхом відображення набору рядів даних мережевого трафіку  $t_s$  до значень у часі шляхом виділення часових ознак.

По-перше, вихідні дані сегментуються за попередньо визначеною шкалою часу  $t_s$ . Новий індекс часу створюється залежно від попередньо визначеної шкали часу  $t_s$  через деякий час

$$\nabla t_i = (t_s \cdot c) - \nabla t_{i-1}, c = 2, \dots, t_N, i = 2, \dots, t_N, \nabla t_i = t_s,$$

де  $t_N = m_i/t_s$

$m_i$  – це максимальний час.

Таким чином, новий індекс часу генерується як  $\nabla t_i = \{t'_1, t'_2, \dots, t'_N\}$ .

У кожному часовому відліку  $\nabla t_i$  містить серію кортежів  $\{(X_i, Y_i)\}$ , формуючи матрицю  $M \times J$  ( $X_i \in R^{M \times J}$ ) та матрицю  $M \times D$  ( $Y_i \in R^{M \times D}$ ), де  $M$  ( $M \geq 1$ ) вказує загальну кількість спостережень за певний час  $\nabla t_i$ ,  $J$  – загальна кількість змінних, і  $D$  ( $D \geq 1$ ) – розмір залежних змінних. Важливо зазначити, що розмір  $M$  може змінюватися, оскільки кількість мережевих подій, що відбуваються в часі, різна.

Для залежних змінних з одним гарячим кодуванням частота мережевих подій понад  $\nabla t_i$  обчислюється як

$$C(Y^k_i) = \sum_1^n I_{Y_i}(\delta_i),$$

де  $\delta_i$  – вказує, чи кожна подія мережі є звичайною чи атакою. Частота кожної однократно закодованої змінної понад  $\nabla t_i$  також визначається для номінальних змінних. Наприклад, для змінних (номера порту джерела та абонента) кількість використаних номерів портів понад  $\nabla t_i$  визначаються. Для інших змінних, репрезентативне значення кожного розміру  $M$  вектор  $\nabla t_i$  визначається як часовий ряд з рівними інтервалами.

Після виділення ознак часового ряду наступним кроком є виконання кореляційного аналізу (векторна авторегресія) і рангове перетворення, щоб оцінити та знайти найкращий набір ознак ( $W_p$ ), що описує релевантність між атаками та звичайними подіями. Зокрема, ми використовуємо рангову кореляцію Спірмена, яка не вимагає жодних припущень щодо розподілу даних.

Потім проводимо рангову трансформацію для відбору найкращих можливих ознак для диференціювання мережевих подій (тобто нормальних) відносно атак. Рангова трансформація підвищує чутливість методик при ненормальному розподілі даних.

*Отримання математичної моделі для прогнозування.*

Моделю прогнозування створюється для прогнозування  $k$ -наперед прогнозованих значень час-

тот мережевих подій, які відносяться до ендогенних змінних.

Нормальна частота подій (NEF) і частота атак (AEF) вимірюються для відображення загальної кількості звичайних подій і подій атаки відповідно. Однією з головних проблем у використанні багатовимірних часових рядів є визначення методу, який фіксує залежності між кількома змінними.

Для прогнозування майбутніх значень шляхом знаходження причинно-наслідкових зв'язків між кількома змінними з часом використовуються векторна авторегресія (VAR) і векторна авторегресія з екзогенними змінними (VARX).

В якості альтернативного методу для аналізу різних типів наборів даних часових рядів нами запропоновано застосування VARX. Даний статистичний метод показав в дослідженнях високу ефективність при виконанні багатовимірного аналізу часових рядів.

При генерації моделі VARX ( $f_h^d$ ) необхідно виконати перевірку на стаціонарність, щоб переконатися в стаціонарності змінних. Тест на одиничний корінь є стандартним методом перевірки стаціонарності.

Для визначення наявності одиничних коренів ми використовуємо критерій Дікі-Фуллера (ADF). Крім того, даний метод також може перевіряти графік автокореляційної функції (ACF); якщо ACF розпадається дуже повільно, можна робити висновки, що дані не стаціонарні.

*Оцінка ризику атак на мережу.*

Враховуючи мережеві події в момент часу  $t_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, T$ , існує  $e_i$  кількість мережевих подій (звичайна/атака) у час  $t_i$ , де  $e_i \geq 0$ .

Наприклад,  $e_i = 12$  у момент часу  $t_i$  вказує, що в момент часу  $t_i$  було помічено 12 мережевих подій. Кожну мережеву подію можна визначити як звичайну або як атаку за допомогою різних методів виявлення вторгнень. Якщо не всі мережеві події класифіковані як звичайні або атакуючі, то визначити вразливість мережевих подій у момент часу  $t_i$  непросто.

Однак оцінка ризику атаки на кількох рівнях може стати в нагоді експертам із безпеки під час вивчення можливих загроз і визначення відповідних пріоритетів захисту.

Ми пропонуємо визначити три рівні ризику атаки (низький, середній і високий) із зазначенням різних пріоритетів. Порогові значення, що розділяють рівні, визначаються емпіричною інтегральною функцією розподілу (ECDF). За допомогою ECDF можна отримати розподіл даних, викликаний наявністю різних субпопуляцій у даних.

ECDF використовується для вимірювання кумулятивних розподілів для різниці ( $x_i$ ) між прогнозованими значеннями норми та атаки, пов'язаних із кількістю сеансів.

Тобто як

$$x_i = \frac{\hat{y}_i^n - \hat{y}_i^a}{s_i}$$

де  $\hat{y}_i^n$  і  $\hat{y}_i^a$  – прогнозована нормальна частота та частота нападів відповідно,

$s_i$  – кількість екземплярів даних у кожному сеансі.

$$\tau_n = F(\theta_0),$$

$$\tau_a = F(\theta_1)$$

де  $\tau_n$  та  $\tau_a$  – верхня та нижня межі для оцінки рівнів ризику атаки відповідно;

$F(\cdot)$  – інтегральна функція розподілу ECDF.

Для  $\theta_0$  і  $\theta_1$  ми використали 25-й і 75-й проценти відповідно.

Перевірка працездатності розробленого підходу.

Для дослідження методу прогнозування нам необхідні дані моніторингу трафіку комп'ютерної мережі. Для цього було використано загальнодоступний набір даних Кіотського протоколу ([https://www.takakura.com/Kyoto\\_data/](https://www.takakura.com/Kyoto_data/)). Набір даних включає 365 файлів (щоденні дані про мережевий трафік) з січня до грудня. Для перетворення даних мережевого трафіку в цільовий масштаб часу використовується змінна «час початку». Змінна 'label' вказує, чи є сеанс атакою чи ні, і він використовується для вимірювання частоти подій шляхом підрахунку загальної кількості звичайних подій і подій атаки.

Оскільки природа мережевого трафіку за своєю суттю є випадковою, у час  $t_i$  може виникати велика кількість подій мережевого трафіку, тоді як у певний час трафіку не виникає взагалі.

Застосовуючи підхід, описаний вище, цей набір даних було перетворено на цільову шкалу часу. Зокрема, перетворення даних було виконано з трьома різними масштабами часу ( $t_s$ ): одна секунда, п'ять секунд і п'ятнадцять секунд, і ми порівняли їх продуктивність. Даний масштаб було обрано інтуїтивно, тому що дослідження щодо ефективної величини масштабування відсутні.

Дискретне Вейвлет перетворення (DWT) застосовано для вилучення ознак із даних мережевого трафіку з рівнем декомпозиції ( $j = 3$ ). При застосуванні DWT вибір відповідного сімейства вейвлетів відіграє важливу роль, оскільки сімейства вейвлетів використовують різні базисні функції для створення набору коефіцієнтів.

Оскільки чітко не досліджено, який вейвлет підійде для аналізу даних мережевого трафіку, ми дослідили три різні материнські вейвлети та порівняли їх подібності та відмінності.

Три вейвлети: симлет symN (Добеші лінійно-асиметричний) ("s6"), найкраще локалізований (Best-localized Daubechies) ("l4") і койфлет ("c6").

За допомогою вейвлетів було виділено тридцять одну функцію. Потім було виконано метод Квятковського-Філіпса-Шмідта-Шина (KPSS) для підтвердження припущення про стаціонарність часового ряду. Оскільки деякі особливості вейвлетів не задовольняли стаціонарне припущення, для їх перетворення було застосовано диференціювання першого порядку. Повторно було проведено статистичну перевірку, щоб визначити, чи відповідають перетворені ознаки стаціонарному припущенню. Виявлено, що всі трансформовані ознаки задовольняють припущення про стаціонарність з рівнем значущості 95 %.

Далі було виконано вибір функцій, щоб визначити ключові характеристики, що представляють мережеві події.

Зокрема, наш підхід був застосований для визначення статистично значущих ознак для аналізу нормальних частот і частот атак.

І останнім етапом є отримання моделей VARX з використанням вибраних функцій як екзогенних змінних і частот мережевих подій як ендегенних змінних для вивчення взаємодії між змінними.

Дані моделі були використані для виконання прогнозу частоти мережевих подій на  $k$  годин вперед. Погодинні моделі VARX були створені з використанням даних за першу годину для прогнозування погодинних значень NEF (частота нормальних подій) і AEF (частота атак) для наступного 23-годинного періоду кожного дня.

Статистичну різницю між фактичними та прогнозованими значеннями перевіряли шляхом застосування знакового рангу Вілкоксона. Як непараметричний тест, він перевіряє будь-які значні відмінності даних. Р-значення більше 0,05 вказує на відсутність істотної різниці нижче 95 % рівня значущості.

При  $t_s = 1$  с значуща різниця між фактичними і прогнозованими значеннями NEF і AEF відсутня.

При  $t_s = 5$  с лише прогноз з вейвлет "s6" (p-value = 0,1316) для значень NEF і модель з вейвлет "c6" (p-value = 0,9455) для значень AEF не показали істотної різниці.

При  $t_s = 15$  с модель з вейвлетом "c6" (р-значення = 0,7796) для значень NEF і модель з вейвлетом "c6" (p-value = 0,4070) і "s6"

( $p$ -value = 0,3296) для значень AEF не показали істотної різниці між прогнозованими та фактичними значеннями.

Аналізуючи односекундний прогноз значень AEF, ми виявили, що моделі мають подібні тенденції зростання і спадання (рис. 3, 4а). Крім того, ми виявили відмінну різницю між моделями прогнозування NEF і AEF. Кожного разу, коли часову шкалу збільшували, у прогнозах NEF зберігався відповідний характер зміни прогнозованих частот відповідно до фактичних. Однак, закономірності зникли для прогнозів AEF. Це вказує на те, що часовий масштаб сильно впливає на якість прогнозу. Чим менше значення часового масштабу, тим ближчі прогнозовані значення до фактичних. Зі зменшенням значення часового масштабу зникає вплив використовуваних вейвлетів, використаних для побудови моделі прогнозування.

Отже, мінімальне значення часового масштабу позитивно впливає для прогнозування і вивчення подій атаки, тоді як використання довшої шкали часу (тобто п'ять або п'ятнадцять секунд) корисне для дослідження звичайних подій в мережевому трафіку.

Оскільки було згенеровано декілька прогностичних моделей з використанням різних вейвлетів, ми також провели тест статистичної перевірки Diebold-Mariano Test (DM), щоб порівняти їх прогнозу точність.

Залишки між фактичним і прогнозованим значенням ( $e_t$ ) від кожної моделі були розраховані з 95 % рівнем довіри на основі залишків співвідношення (тобто відсотків) статистичних відмінностей продуктивності. У часовому масштабі ( $t_s = 1$  с) спостерігалось приблизно 80 % і 70 % залишків для NEF і AEF у січні, і суттєвих відмінностей між моделями не виявлено. Подібні результати спостерігалися в різних часових масштабах. Ми виявили, що шкала часу в одну секунду показала кращі результати, ніж шкала часу в п'ять або п'ятнадцять секунд.

Кумулятивну функцію розподілу (CDF) значень абсолютних помилок було згенеровано для оцінки моделей з різними вейвлетами. Суттєвої різниці в продуктивності серед вейвлетів із різними масштабами часу не було виявлено. Але ми виявили кращу ефективність прогнозування з односекундною шкалою часу. Крім того, вейвлет "сб" показав відносно кращу продуктивність у прогнозуванні NEF. Всі три вейвлети показали майже однакову продуктивність у прогнозуванні AEF. Нарешті, ми встановили, що спостерігалось збільшення абсолютних похибок із довшими часовими масштабами.

Продуктивність моделі прогнозування для різних вейвлетів також вимірювалася шляхом обчислення різниці між фактичними та прогнозованими значеннями за допомогою тесту DM.

Хоча істотної різниці між вейвлетами не спостерігалось, результат між сб і l4 показав дещо вищу статистичну значущість ( $p < 0,05$ ), ніж інші в деякі місяці. Подібні результати були встановлені при проведенні тесту DM з різними часовими масштабами. Загалом, не було значної різниці в аналізі NEF і AEF з різними вейвлетами протягом більшості місяців.

**Висновки.** Наші дослідження встановили можливість застосування теорії аналізу часових рядів для прогнозування трафіку комп'ютерних мереж. Дане прогнозування може бути використане як інструмент визначення ризику майбутніх несанкціонованих втручань в мережу.

В роботі запропонований новий підхід до прогнозування ризиків кібератак на основі даних моніторингу трафіку мереж. Даний підхід складається з послідовних 3 етапів: перетворення трафіку КМ в багатовимірний часовий ряд шляхом масштабування з певним кроком за часом, застосування вейвлет-перетворення та регресійного аналізу з екзогенними змінними.

Для визначення оптимального кроку масштабування під час аналізу даних мережевого трафіку здійснені дослідження для різних часових шкал. Хоча масштаб часу може бути обрано довільною величиною в даному підході, встановлено, що збільшення часу масштабування обернено пропорційне ефективності класифікації оцінки ризику атаки.

Застосування вейвлет-перетворення дозволило отримати вейвлет-функції для визначення погодинних змін подій у мережі та оцінити частоту подій у мережі, різка зміна якої може бути маркером несанкціонованих дій в мережі. Під час генерації погодинних моделей прогнозування були використані різні вейвлет-функції через постійну зміну моделей мережевого трафіку.

Встановлено, що різні типи вейвлетів давали статистично значущі результати залежно від визначеного масштабу часу.

Зі шкалою часу в одну секунду застосування трьох типів вейвлетів давали статистично значущо однакові результати щодо продуктивності і точності прогнозу.

Однак, статистично значуща різниця спостерігалась при прогнозуванні ризиків на наступні місяці при п'яти- та п'ятнадцяти секундній шкалах часу. Це може бути пояснено тим, що

загальний об'єм мережевого трафіку (зокрема, аномальні події в мережі) змінюється щомісяця. Додатковий аналіз помісячного мережевого трафіку показав, що великий об'єм мережевого трафіку часто проявляється як високий сплеск при оцінці ризиків атаки, особливо в часовому масштабі п'ять і п'ятнадцять секунд.

Доведена ефективність запропонованої нами моделі прогнозування для прогнозування частоти мережевих подій на одну годину вперед. Під час оцінки частоти нормальних подій в мережі не спостерігалось суттєвої різниці в продуктивності з точки зору точності прогнозування. Подібні

результати були отримані при оцінці передбачуваних частот атак з трьома різними часовими масштабами.

Порівнюючи показники класифікації між прогнозованими та фактичними значеннями частот мережевих подій для визначення ризику атаки, відмічені деякі відмінності в точності.

Встановлено, що тип вейвлетів не дає значущої різниці в продуктивності класифікації ризиків атак. Але, шляхом статистичного аналізу, виявлено, що вейвлети  $s_6$  і  $s_8$  були визначені як значущі вейвлет-характеристики для аналізу даних мережевого трафіку.

#### Список літератури:

1. Abdullah A. Intrusion detection forecasting using time series for improving cyber defence / A. Abdullah, T. R. Pillai, L. Z. Cai. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 3 (1), 28–33.
2. Ahmed M. A survey of network anomaly detection techniques / M. Ahmed, A. N. Mahmood, J. Hu. *Journal of Network and Computer Applications*, 60, 19–31.
3. Artail H. A hybrid honeypot framework for improving intrusion detection systems in protecting organizational networks / H. Artail, H. Safa, M. Sraj, I. Kuwatly, Z. Al-Masri. *Computers & security*, 25 (4), 2006, 274–288.
4. Awad M. Support Vector Machines for Classification / M. Awad, R. Khanna. Apress, Berkeley, CA, Ch. 3, 2015, pp. 39–66.
5. Barford P. A signal analysis of network traffic anomalies / P. Barford, J. Kline, D. Plonka, A. Ron. *Proceedings of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Internet measurement*. 2002, pp. 71–82.
6. Beliakov G. Aggregation Functions: A Guide for Practitioners, 1st Edition / G. Beliakov, A. Pradera, T. Calvo. Springer Publishing Company, Incorporated, 2008.
7. Bernacki J. Anomaly detection in network traffic using selected methods of time series analysis / J. Bernacki, G. Kołaczek. *Computer Network and Information Security*, 9, 2015, p. 10–18.
8. Besharati E. Lr-hids: logistic regression host-based intrusion detection system for cloud environments / E. Besharati, M. Naderan, E. Namjoo. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10 (9), 2019, 3669–3692.
9. Boto-Giralda D. Wavelet-based denoising for traffic volume time series forecasting with self-organizing neural networks / D. Boto-Giralda, F. J. D'íaz-Pernas, D. Gonzalez-Ortega. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 25 (7), 2010, p. 530–545.
10. Bouzoubaa K. Comparative study of features selection methods: Case of denial of service attacks forecasting / K. Bouzoubaa, Y. Taher, B. Nsiri. *International Conference on Algorithms, Computing and Systems*, 2020. pp. 40–44.
11. Bouzoubaa K. Dos attack forecasting: A comparative study on wrapper feature selection / K. Bouzoubaa, Y. Taher, B. Nsiri. *International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision*, 2020. IEEE, pp. 1–7.
12. Box G. E. Time series analysis: forecasting and control / G. E. Box, G. M. Jenkins, G. C. Reinsel, G. M. Ljung. John Wiley & Sons, 2015.
13. Cao J. An improved network traffic classification model based on a support vector machine / J. Cao, D. Wang, Z. Qu, H. Sun, B. Li, C.-L. Chen. *Symmetry*, 12 (2), 2020, p. 301.
14. Celenk M. Anomaly prediction in network traffic using adaptive wiener filtering and arma modeling / M. Celenk, T. Conley, J. Graham, J. Willis. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. IEEE, pp. 2008, p. 3548–3553.
15. Cortez P. Multi-scale internet traffic forecasting using neural networks and time series methods / P. Cortez, M. Rio, M. Rocha, P. Sousa. *Expert Systems*, 29 (2), 2012, p. 143–155.
16. Curiac D.-I. Malicious node detection in wireless sensor networks using an autoregression technique / D.-I. Curiac, O. Baniyas, F. Dragan, C. Volosencu, O. Dranga. *International Conference on Networking and Services (ICNS'07)*. 2007, IEEE, pp. 83–83.
17. Winter J. C. Comparing the pearson and spearman correlation coefficients across distributions and sample sizes / J. C. Winter, S. D. Gosling, J. Potter. A tutorial using simulations and empirical data. *Psychological methods*, 21 (3), 2016, p. 273.
18. Diebold F. X. Comparing predictive accuracy / F. X. Diebold, R. S. Mariano. *Journal of Business & Economic Statistics*, 20 (1), 2002, pp. 134–144.

19. Dongxia L. An intrusion detection system based on honeypot technology / L. Dongxia, Z. Yongbo. *2012 international conference on computer science and electronics engineering*. Vol. 1. IEEE, 2012, pp. 451–454.
20. Huang C.-T. Wavelet-based real time detection of network traffic anomalies / C.-T. Huang, S. Thareja, Y.-J. Shin. *Securecomm and Workshops*. IEEE, 2006, pp. 1–7.
21. Huang P. A non-intrusive, wavelet-based approach to detecting network performance problems / P. Huang, A. Feldmann, W. Willinger. *Proceedings of the 1st ACM SIGCOMM Workshop on Internet Measurement*, 2001, pp. 213–227.
22. Iglesias F. Analysis of network traffic features for anomaly detection / F. Iglesias, T. Zseby. *Machine Learning*, 101 (1), Oct 2015, pp. 59–84.

#### **Moyseenko O.V. PREDICTION OF CYBER ATTACKS BASED ON TRAFFIC INTENSITY MONITORING IN COMPUTER NETWORKS**

*Numerous studies of network anomalies or intrusive network events do not allow solving some network security problems. Research challenges still remain unsolved due to the variability of network traffic patterns and intrusion scenarios. The paper analyzes network traffic data to detect suspicious network activities (ie, intrusions) using time series forecasting methods. This study presents an approach to predicting the frequency of network events (typical and unauthorized) by building prediction models and assessing the risks of attacks. Wavelet functions are used to determine the hourly changes of events in the network and to determine the frequency of events in the network, a sudden change of which can be a marker of unauthorized actions in the network. A multivariate time series method, vector automatic regression with exogenous variables (VARX), is used to predict future network traffic events. Attack risks for network events are assessed using an adaptive threshold method and evaluated by performing classification using two machine learning methods. A comparative assessment was made between different time scales (one second, five seconds and fifteen seconds) and three wavelets in determining attack risks. Models with VARX demonstrate the ability to analyze multidimensional network traffic time series data to predict future network events and assess the risks of their attacks. The effectiveness of our proposed forecasting model for predicting the frequency of network events one hour ahead has been proven. When evaluating the frequency of normal events in the network, no significant difference in performance was observed in terms of prediction accuracy. Similar results were obtained when estimating predicted attack frequencies with three different time scales.*

**Key words:** Deception, Multivariate time series analysis, Attack risk estimation, Honeypot, Wavelet Transform, Network intrusion.

UDC 004.4

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.1/22>

**Morozov A.V.**

Zhytomyr Polytechnic State University

**Levkivskiy V.L.**

Zhytomyr Polytechnic State University

**Plechystyy D.D.**

Zhytomyr Polytechnic State University

## ACTIVATION FUNCTIONS IN NEURAL NETWORKS: OVERVIEW AND COMPARISON

*Neural networks have become one of the most powerful technologies of our time, revolutionizing many industries. Their capabilities allow solving complex tasks that were previously considered impossible. Neural networks consist of interconnected nodes called neurons that transmit and process information. Networks can have different structures, from simple ones with a few layers to complex ones with tens or even hundreds of layers. Each layer can contain thousands or millions of neurons, and connections between neurons can have different weights. Neural network training algorithms can be complex to tune and optimize, and the training process can be time-consuming, especially for large networks. Activation functions play a key role in neural networks by performing several important functions, namely, activation functions introduce nonlinearity into neural networks, which makes them capable of learning from complex data and performing complex tasks. In addition, activation functions determine the neuron's output value, which can be interpreted as a probability, magnitude, or other type of value, depending on the task. Neural networks are highly dependent on the activation functions used in their neurons and play a critical role in shaping the behavior and performance of neural networks. The article presents a comprehensive overview and comparative analysis of various activation functions commonly used in deep learning. Deep learning is a branch of machine learning that uses neural networks with a deep architecture. The paper examines various activation functions (Sigmoid, Tanh, ReLU, LeakyReLU, ELU, SELU, Swish, Mish, Softmax) used in neural networks. Their mathematical properties, advantages and limitations of each activation function are described in detail, as well as empirical data from experiments performed on reference datasets. The conducted studies provide insight into the selection and optimization of activation functions for neural network architecture.*

**Key words:** Activation functions, Neural networks, Deep learning, Sigmoid, Tanh, ReLU, LeakyReLU, ELU, SELU, Swish, Mish, Softmax.

**Formulation of the problem.** Neural networks are a fundamental building block of modern machine learning systems, and the choice of activation function profoundly impacts their expressiveness and optimization behavior. A deeper understanding of activation functions can improve the performance of neural networks, optimize them for specific tasks, and understand the principles of their operation. Studying different activation functions and their impact on neural networks is an active area of research. Activation functions introduce nonlinearity into the network, allowing it to learn complex relationships in the data. Just as humans need senses to understand the world, neural networks need activation functions to interpret information correctly. Activation functions are like filters that decide which signals to let through and which to ignore. They are crucial because they

add an element of decision-making, allowing neural networks to understand complex relationships in data.

This paper will present a study and comparison of the characteristics of different activation functions. How activation functions affect how neural networks learn and perform. The world around us constantly changes, depending on how we perceive it. It is similar to trying on different pairs of glasses. Each pair provides a unique view of the world. Some glasses can improve your vision; others can change how you see colors or add special effects, making the world more attractive or unusual. Similarly, each activation function changes the way the neural network interprets data. Some make learning easier, while others can slow it down or cause confusion.

This research paper aims to provide a clear and comparative view of the different activation functions



used in deep learning. It also aims to make complex mathematical concepts accessible to a broader audience.

The study will review different activation functions, focusing on their advantages and disadvantages. To better understand them, an experiment based on the results of actual experiments using reference datasets will be conducted. The experiment will provide an opportunity to see how different activation functions work in practice, gaining valuable insights into their effectiveness.

#### **Analysis of recent research and publications.**

F. Kamalov, A. Nazir, M. Safaraliev, A. K. Cherukuri, and R. Zgheib delve into a lesser-explored dimension of neural network architecture: the correlation between activation functions and geometric model performance in feature space. While previous studies have extensively examined the impact of activation functions on model accuracy, little attention has been paid to their impact on the underlying geometry of neural network models. This study uses an empirical analysis to examine how different activation functions affect the geometric arrangement of trained neural network models. In particular, the analysis aims to elucidate the interaction between activations in the hidden and output layers, the geometry of the trained models, and their overall performance. To facilitate understanding, the paper proposes a visualization of trained neural network models, making it easier for researchers to intuitively understand the impact of activation functions on model geometry and performance [1].

M. Kaloev and G. Krustev explore the dynamic landscape of neural network research, which has witnessed rapid progress that has led to the emergence of various activation functions, each boasting unique characteristics. Consequently, the compatibility and interchangeability of these activation functions are becoming increasingly relevant in the field. This article addresses these issues by comprehensively studying deep neural networks' design, training, and evaluation (DNNs), focusing on their use in pattern recognition tasks. Through a thorough analysis, we investigate the performance and behavior of three standard activation functions – the sigmoid function (Sigmoid), the hyperbolic tangent (tanh), and the rectified linear unit (ReLU) – when used in the hidden layers of a neural network. By elucidating the nuances of these activation functions, the study aims to provide valuable information crucial for the optimal design and selection of activation functions in ANNs. Ultimately, this knowledge will contribute to developing neural network architecture and application areas [2].

Garrett Bingham, Risto Miikkulainen propose an innovative method to automate the customization of activation functions, which leads to a consistent improvement in network performance. Using evolutionary search, the proposed approach reveals the fundamental structure of the activation function, while gradient descent optimizes its parameters in different network segments and during training. Experimental validation on four different neural network architectures using the CIFAR-10 and CIFAR-100 image classification datasets has confirmed the effectiveness of this method. In particular, it identifies general-purpose activation functions and adapts specialized functions for different network architectures, consistently outperforming ReLU and other alternative activation functions by a significant margin. Thus, this automated optimization method is a promising way to improve the application of deep learning in various tasks [3].

Shiv Ram Dubey, Satish Kumar Singh, and Bidyut Baran Chaudhuri offer a detailed analysis and overview of activation functions (AFs) in neural networks for deep learning. It delves into various classes of FAs, including logistic sigmoid and tangent, ReLU-based, ELU-based, and learning-based functions. In addition, it discusses in detail various characteristics of ANNs, including input range, monotonicity, and smoothness. In addition, the paper evaluates performance by comparing 18 state-of-the-art ANNs with different network architectures and datasets. The findings from this analysis are intended to provide researchers with valuable guidance for further research and help practitioners select the most appropriate ANNs for their specific applications [4].

Andrea Apicella, Francesco Donnarumma, Francesco Isgro, and Roberto Prevete review the different models of learnable activation functions, starting with a discussion of the terminology used in the literature on “activation function”. After that, he introduces a taxonomy of learnable activation functions, outlines the common and unique characteristics of current and past models, and thoroughly analyzes this methodology's main advantages and disadvantages. Notably, the article emphasizes that numerous proposed methodologies resemble integrating additional layers of neurons using fixed (non-trained) activation functions combined with simple local rules governing the respective weight layers [5].

Activation functions in artificial neural networks play a crucial role, allowing the network to comprehend and model complex nonlinear relationships between inputs and corresponding

outputs. In [6], SiddharthSharma, SimoneSharma, and AnidhyaAthaiya emphasize the need for an activation function and nonlinearity in neural networks. This study also provides a brief description of various activation functions used in deep learning and describes the importance of activation functions for developing an effective model and improving the performance of artificial neural networks.

Choosing the optimal activation function for a neural network is one of the critical tasks in machine learning. Throughout the field's history, many different activation functions have been proposed, making choosing the optimal one challenging. Over time, new and improved activation functions appear, making the choice even more difficult [7–9].

The choice of activation functions in deep networks has a significant impact on the dynamics of learning and task performance. The most successful and widely used activation function is RectifiedLinearUnit (ReLU). Although various alternatives to ReLU have been proposed, they have yet to be able to replace it due to conflicting benefits. In this paper, the authors propose to use automatic search methods to discover new activation features. The researchers verify the effectiveness of searches by conducting an empirical evaluation with the best-discovered activation function [7].

Activation functions are crucial in deep learning networks because the nonlinear capability of activation functions endows deep neural networks with accurate artificial intelligence. Nonlinear nonmonotonic activation functions such as straightened linear units, hyperbolic tangent (tanh), sigmoid, Swish, Mish, and Logish work well in deep learning models; however, only a few of them are widely used in most applications due to their inconsistency. In [8], a new nonlinear activation function called Smish (SmoothMish) was proposed. Unlike other activation functions, such as ReLU, Smish has a smooth derivative, making it more resistant to vanishing gradients during neural network training. Smish is non-monotonic, which allows it to model more complex nonlinear dependencies. It has a range of output values from  $-1$  to  $1$ . The potential impact of Smish on deep learning and artificial intelligence is significant, inspiring further exploration and research.

This paper proposes a universal activation function (UAF) that achieves near-optimal performance in quantification, classification, and reinforcement learning tasks [9].

**Formulation of the goals of the article.** The choice of activation function is an important step in designing a neural network. Different activation

functions have different properties and can lead to different results. Therefore, the purpose of this study is to provide a detailed overview of various commonly used activation functions.

**Outline of the main research material.** Understanding and comparing different activation functions used in neural networks is an important research topic. Each activation function has unique properties that affect the dynamics and behavior of the neural network. The activation functions to be considered cover a diverse range, including Sigmoid, Tanh (hyperbolic tangent), ReLU (rectified linear unit), LeakyReLU, ELU (exponential linear unit), SELU (scaled exponential linear unit), Swish, Mish, Softmax.

Activation functions are mathematical algorithms that transform neuronal inputs. In other words, they determine whether a neuron will be active based on its input. There are many different activation functions, each with properties, as shown graphically in Figure 1.

The sigmoidal activation function, or the logistic function, is a nonlinear function widely used in neural networks. It converts input values into a range from  $0$  to  $1$  (see Figure 1) and is calculated using formula 1.

$$f(x) = \frac{1}{(1 + \exp(-x))}. \quad (1)$$

The sigmoidal activation function is used in various machine-learning tasks, including classification, prediction, natural language processing, image processing, and others. It has advantages over other activation functions.

The activation function's advantages include simplicity, nonlinearity, and interpretability. The sigmoid function is nonlinear, which allows neural networks to model complex relationships between input data and output values. The function is interpreted because it converts input data into probabilities and is easy to understand and implement.

However, it's essential to be aware of the potential challenges that the sigmoidal activation function can pose. Saturation, for instance, can occur when the input values become very large or very small, leading to a halt in the learning process of neurons. Similarly, the vanishing gradient problem, where the error gradient becomes very small during training, can also hinder the neural network's performance.

The hyperbolic tangent (Tanh) is a mathematical function often used in neural networks and other machine learning fields. It calculates the hyperbolic tangent of  $x$ , which can be any actual number.

Tanh (hyperbolic tangent) is similar to the sigmoid function but ranges from  $-1$  to  $1$  (see Figure 1).

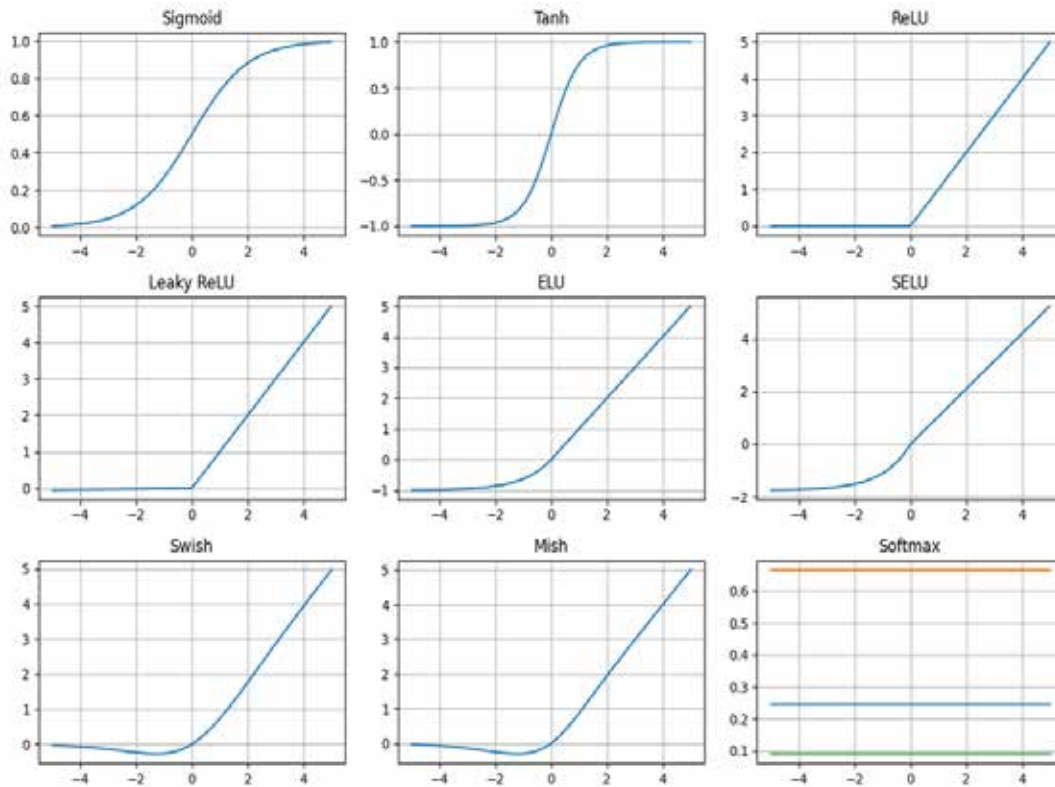


Fig. 1. Graphical representation of activation functions

It is calculated using the formula 2. Tanh is often used as an activation function in hidden layers of neural networks to help prevent the vanishing gradient problem. Tanh can be used to scale or center data.

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

The disadvantages of Tanh include incomplete saturation. The function becomes saturated at the edges of the range but never reaches  $-1$  or  $1$ , which means that for large values of  $x$ , the function ceases to affect the output significantly.

The hyperbolic tangent function is not symmetric around the origin ( $f(x) \neq f(-x)$  for  $x \neq 0$ ). It means that the value of  $\tanh(x)$  for positive values of  $x$  is not equal to that of  $\tanh(-x)$  for negative values of  $x$ .

Formula (2) contains exponential functions that are not symmetric. The derivative of  $\tanh$  (Formula 3) shows that the derivative of  $\tanh$  is always greater than  $0$  when  $x > 0$  and less than  $0$  when  $x < 0$ . It means that the graph of  $\tanh$  increases in the positive direction and decreases in the negative direction.

$$\tanh'(x) = 1 - \tanh^2(x). \quad (3)$$

ReLU (RectifiedLinearUnit) is a widely used nonlinear activation function in artificial neural networks, especially deep learning architectures. It

works by linearly activating input values greater than zero and zeroing out negative values (see Figure 1). The activation function is simple and computationally efficient (Formula 4).

$$f(x) = \max(0, x). \quad (4)$$

ReLU is simple and easy to understand and implement. Its computation requires few resources. It is usually used in the hidden layers of deep neural networks.

ReLU also has disadvantages. If the neuron receives only negative input values, it will always output  $0$ . It can lead to the neuron becoming “dead” and not participating in training. The problem of the vanishing gradient appears again. When the gradient of the ReLU function is  $0$  for negative values of  $x$ , it can make it challenging to train the neural network. Despite these drawbacks, ReLU is one of the most popular activation functions. It is often used in neural networks for classification, prediction, computer vision, natural language processing, etc. ReLU is also used in generative models such as GAN (Generative Adversarial Networks) to generate images, text, and other data.

LeakyReLU (RectifiedLinearUnit) is a modification of the ReLU activation function used in neural networks. LeakyReLU extends the concept of ReLU

by introducing a slight non-zero slope for negative input values, thus alleviating the problem of neuronal “death” that standard ReLU faces (see Figure 1). It also helps prevent the vanishing gradients that can occur when using ReLU.

The formula calculates the activation function of LeakyReLU:

$$f(x) = \max(\alpha x, x), \quad (5)$$

where  $x$  is the input value;  $\alpha$  is slope coefficient, which can be 0.1/0.01/0.001

A small slope for negative values helps gradients propagate through the network during training. LeakyReLU can lead to better neural network performance, especially for tasks with a lot of negative data.

The disadvantages include the need to adjust the slope coefficient. Also, LeakyReLU may be a less effective activation function for tasks where the input data is mostly positive.

The LeakyReLU activation function is simple and effective and can help prevent overfitting. It can be used for object recognition in images, natural language processing, and text generation.

The ELU (Exponential Linear Unit) activation function was introduced in 2015 in the article “Fast and Accurate Deep Network Learning by Exponential Linear Units (ELUs)” by Djork-Arne Clevert, Thomas Unterthiner, and Sepp Hochreiter [10].

While ELUs share similarities with ReLUs, they exhibit distinct behavior (see Figure 1). The ELU behaves like a regular ReLU for positive values, preserving the input value. However, for negative values, the ELU’s use of an exponential function results in a value closer to zero than that returned by the ReLU. This characteristic can be advantageous in specific deep-learning scenarios.

The ELU activation function (Formula 6) introduces an additional hyperparameter  $\alpha$  for tuning, which can be set manually.

$$f(x) = \begin{cases} x, & x \geq 0 \\ \alpha(e^{-x} - 1), & x < 0 \end{cases} \quad (6)$$

ELU can help neural networks learn faster than other activation functions, such as ReLU or sigmoid function. It has stable gradients, which can help prevent the gradient from disappearing during neural network training. Smoothed nonlinearity with improved robustness to noisy input data compared to ReLU.

The disadvantages include relative complexity. ELU is a more complex activation function than ReLU

or sigmoid, which can make it more computationally expensive. In addition, ELU has a hyperparameter that needs to be customized, making it difficult to use.

In [11], the authors proposed learning the ELU parameterization to determine the correct activation form at each level in CNN. The results obtained on the MNIST, CIFAR-10/100, and ImageNet datasets using NiN, Overfeat, All-CNN, and ResNet networks show that the proposed parametric ELU (PELU) performs better than the non-parametric ELU.

The Scaled Exponential Linear Unit (SELU) extends the ELU concept by including a normalization term to ensure that activations are self-normalized across the network (see Fig. 1).

SELU has fixed values for the parameters  $\alpha$  and  $\lambda$ , guaranteeing self-normalization of the activation function. It means that the output values of SELU are always automatically scaled to the mean and standard deviation (Formula 7).

$$f(x) = \begin{cases} \lambda x, & x \geq 0 \\ \lambda \alpha (e^x - 1), & x < 0 \end{cases} \quad (7)$$

where  $\alpha$  is the scaling constant;  $\lambda$  is the shift constant.

The Swish activation function, proposed as an alternative to ReLU, introduces smooth nonlinearity while maintaining computational efficiency (see Figure 1). It presents a similar performance to ReLU with potentially smoother activation behavior. Moreover, it introduces nonlinearity without losing computational efficiency.

The Swish activation function is calculated by formula (8).

$$f(x) = x \times \text{sigmoid}(x) \quad (8)$$

The Swish activation function improves neural network performance in tasks such as image recognition, natural language processing, and machine translation. Its smooth gradients can help in the training process. Also, the activation function can be used instead of ReLU or sigmoid without significantly changing the neural network architecture.

The Mish activation function (Mishra’s Softmax-based activation function), characterized by a flat curve, offers a smooth alternative to ReLU and its variants (see Fig. 1). D. Mishra proposed the activation function in his study [12], which is calculated by the formula (9).

$$f(x) = x \times \tanh(\ln(1 + e^x)) \quad (9)$$

Mish provides smooth, differentiable nonlinearity, making it convenient for use in neural networks. Its continuous derivative over the entire definition domain makes it robust to gradient vanishing. Mish

has no upper or lower bound, allowing it to model a wide range of values. It demonstrates competitive performance compared to other activation functions.

The Softmax activation function is used in neural networks to normalize neuronal outputs to a probability distribution. The derivative of the Softmax function is more complex and depends on the cross-entropy loss function used in neural network training. It is used as an output layer activation function in multiclass classification tasks. It converts raw scores into a probability distribution, facilitating the interpretation of model results (see Fig. 1). Mathematically, the activation function is described by formula (10).

$$f(x) = \frac{e^x}{\sum_j e^x} \quad (10)$$

Softmax can be used to classify images from a set of possible classes, to classify text documents, to translate text from one language into another by generating probabilities for each possible word in the translation, etc.

We will choose the CIFAR-10 dataset (Canadian Institute for Advanced Research, ten classes) to test the performance and obtain metrics of different activation functions.

The CIFAR-10 dataset is a widely used reference dataset in computer vision. General information about the CIFAR-10 dataset:

- It is a reference dataset widely used in computer vision and machine learning research.
- The dataset consists of 60,000 32x32 color images in 10 classes (airplanes, cars, birds, cats, deer, dogs, frogs, horses, ships, and trucks), with 6,000 images in each class (5000 training and 1000 test images per class).
- Each image in the CIFAR-10 dataset is labeled with a single class label indicating the object category to which it belongs. The class labels are represented by integers from 0 to 9, corresponding to the ten classes in the dataset.
- The images are of relatively low resolution, which makes them suitable for training and evaluating image classification models.
- Researchers and practitioners use CIFAR-10 to compare the performance of different machine learning methods and algorithms.

Overall, the CIFAR-10 dataset is a valuable resource for training and evaluating image classification models and serves as a standard benchmark for the computer vision community.

To conduct the study, we built a hidden layer neural network model of 128 neurons and systematically evaluated its performance using each previously

described activation function. Each activation function was applied to the hidden layer separately, which allowed us to comprehensively compare their effectiveness in influencing the behavior and performance of the network.

During the experiments with the neural network, various metrics were collected from each experiment to evaluate its performance under different activation functions. These metrics included but were not limited to, accuracy. Careful analysis of these metrics provided valuable insights into each activation function's relative strengths and weaknesses in the context of the CIFAR-10 dataset.

In addition, it is worth noting that the number of training epochs was intentionally limited to 10 for each experiment. This intentional limitation was introduced to model scenarios where computational resources or time constraints require shorter training periods. By imposing this restriction, the goal was to assess the readiness of different activation functions to adapt and perform optimally under limited training conditions.

Conducting experiments under such controlled conditions effectively assesses the reliability and generalizability of each activation function within a limited training time. This approach allows one to assess the absolute performance of each activation function and its ability to converge quickly and efficiently in a limited training environment.

The activation functions investigated included sigmoid, hyperbolic tangent, ReLU, leaky ReLU, ELU, SELU, Swish, Mish, and Softmax. Each activation function was tested in a controlled experimental setup with a limited number of epochs set to 10. The results of the experiment are shown in Figure 2.

The experiments revealed significant variations in the performance of neural network models depending on the choice of activation function. In particular, such activation functions as ELU, SELU, and ReLU proved to be the most effective in terms of classification accuracy and convergence speed within the limited ten epochs.

The experimental results emphasize the critical role of activation functions in shaping the behavior and performance of neural networks, especially in image classification tasks. Activation functions such as ELU, SELU, and ReLU demonstrated excellent performance, indicating their effectiveness in mitigating the vanishing gradient problem and promoting faster convergence.

Despite the limited number of epochs, the experiments provide valuable information about

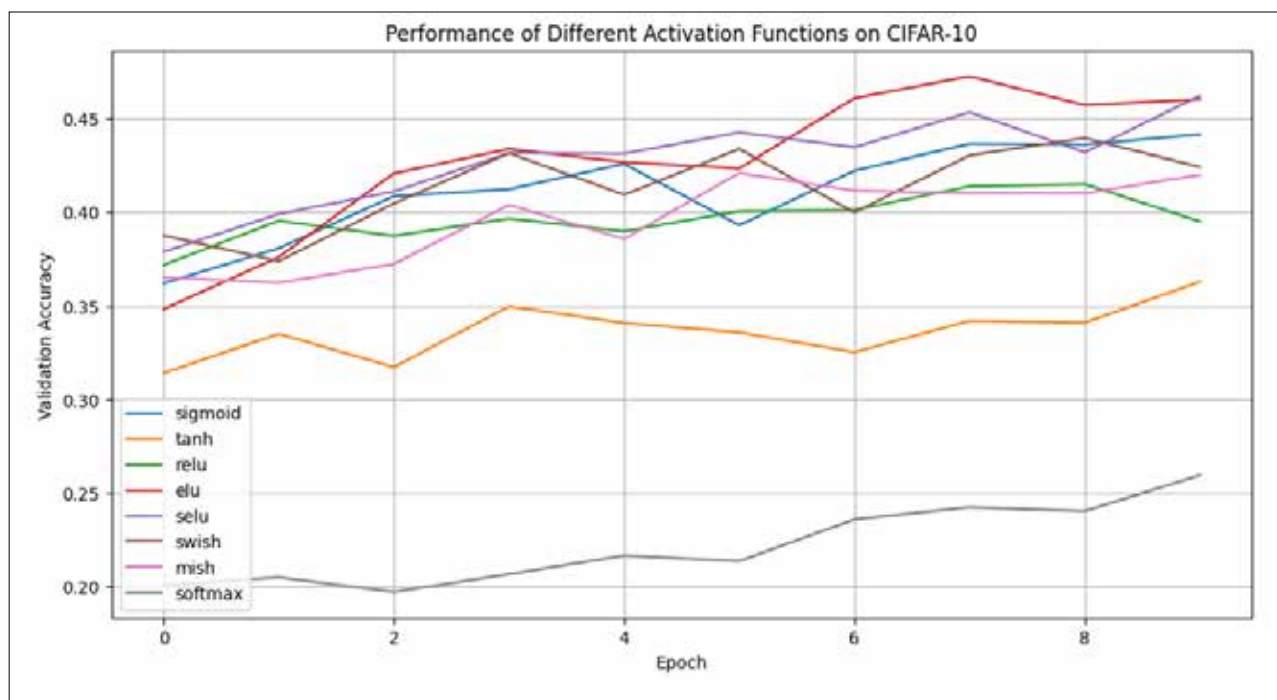


Fig. 2. Results of the experiment

the effectiveness of different activation functions in improving the performance of neural network models on the CIFAR-10 dataset. The results emphasize the importance of selecting appropriate activation functions to optimize the performance and efficiency of neural network models under limited training.

**Conclusions.** This study investigated the performance of different activation functions in the hidden layers of a neural network using the CIFAR-10 dataset. The activation functions studied were sigmoidal, tangent hyperbolic, ReLU, LeakyReLU, ELU, SELU, Swish, Mish, and Softmax.

Through extensive experiments and analysis, it was found that the choice of activation function significantly affects the neural network's performance. Among the tested activation functions, ELU, SELU, and ReLU proved the most effective in improving network performance on the CIFAR-10 dataset.

In particular, ELU, SELU, and ReLU demonstrated better classification accuracy and convergence speeds than other activation functions. These results align with previous studies that indicate the effectiveness of

ELU and SELU in mitigating the vanishing gradient problem and promoting faster convergence in deep neural networks.

The results emphasize the importance of careful activation function selection when designing and training neural networks for image classification tasks. By selecting appropriate activation functions such as ELU, SELU, or ReLU, researchers and practitioners can improve their neural network models' overall performance and efficiency.

Further research can explore the application of these activation functions in other domains and datasets to test their effectiveness in different contexts. In addition, research into new activation functions and optimization methods could lead to further advances in deep learning and neural network design.

Overall, the study makes a valuable contribution to the selection and optimization of activation functions to improve the performance of neural networks, especially in the context of image classification tasks using the CIFAR-10 dataset.

#### Bibliography:

1. Kamalov F., Nazir A., Safaraliev M., Cherukuri A. K., Zgheib R. Comparative analysis of activation functions in neural networks. 2021. 28th IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems (ICECS), Dubai, United Arab Emirates, 2021, pp. 1c6, doi: 10.1109/ICECS53924.2021.9665646.
2. Kaloev M., Krastev G. Comparative Analysis of Activation Functions Used in the Hidden Layers of Deep Neural Networks. 2021. 3rd International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA), Ankara, Turkey, 2021, pp. 1–5, doi: 10.1109/HORA52670.2021.9461312.

3. Garrett Bingham, Risto Miikkulainen. Discovering Parametric Activation Functions, *Neural Networks*, Volume 148, 2022, Pages 48–65, ISSN 0893-6080, <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2022.01.001>
4. Shiv Ram Dubey, Satish Kumar Singh, Bidyut Baran Chaudhuri. Activation functions in deep learning: A comprehensive survey and benchmark, *Neurocomputing*, Volume 503, 2022, Pages 92–108, ISSN 0925-2312, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.06.111>.
5. Andrea Apicella, Francesco Donnarumma, Francesco Isgro, Roberto Prevete. A survey on modern trainable activation functions, *Neural Networks*, Volume 138, 2021, Pages 14–32, ISSN 0893-6080, <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2021.01.026>.
6. Sharma S., Sharma S., Athaiya A. Activation functions in neural networks. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 2020. Vol. 4, Issue 12, ISSN No. 2455-2143, P. 310–316. Published Online April 2020 in IJEAST (<http://www.ijeast.com>). doi : 10.33564/IJEAST.2020.v04i12.054
7. Ramachandran Prajit, Barret Zoph, Quoc V. Le. Searching for activation functions. arXiv preprint arXiv:1710.05941 (2017)
8. Wang X., Ren H., Wang A. Smish: A Novel Activation Function for Deep Learning Methods. *Electronics*, 2022, 11, 540. <https://doi.org/10.3390/electronics11040540>
9. Yuen B., Hoang M.T., Dong X. et al. Universal activation function for machine learning. *Sci Rep.* 11, 18757 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96723-8>
10. Clevert D.A., Unterthiner T., Hochreiter S., Fast and accurate deep network learning by exponential linear units (elus). arXiv 2015. arXiv preprint arXiv:1511.07289, 2. 2016. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1511.07289>
11. Trottier L., Giguere P., Chaib-draa B. Parametric exponential linear unit for deep convolutional neural networks. 2017 16th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA), Cancun, 18–21 December 2017. 2017. URL: <https://doi.org/10.1109/icmla.2017.00038>
12. Misra D. Mish: A self regularized non-monotonic activation function. arXiv preprint arXiv:1908.08681v3 [cs.LG] 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.08681>

### **Морозов А.В., Левківський В.Л., Плечистий Д.Д. ФУНКЦІЇ АКТИВАЦІЇ В НЕЙРОННИХ МЕРЕЖАХ: ОГЛЯД ТА ПОРІВНЯННЯ**

Нейронні мережі стали однією з найпотужніших технологій сучасності, що революціонізують безліч галузей. Їхні можливості дозволяють вирішувати складні задачі, які раніше вважалися нездійсненними. Нейронні мережі складаються з взаємозв'язаних вузлів, які називаються нейронами, що передають та обробляють інформацію. Мережі можуть мати різну структуру, від простих з кількома шарами до складних з десятками або навіть сотнями шарів. Кожен шар може містити тисячі або мільйони нейронів, а зв'язки між нейронами можуть бути з різними вагами. Алгоритми навчання нейронних мереж можуть бути складними для налаштування та оптимізації, а процес навчання може займати багато часу, особливо для великих мереж. Функції активації відіграють ключову роль в нейронних мережах, виконуючи декілька важливих функцій, а саме функції активації вводять нелінійність в нейронні мережі, що робить їх здатними вчитися на складних даних та виконувати складні задачі. Крім того, функції активації визначають вихідне значення нейрона, яке може бути інтерпретовано як ймовірність, величина або інший тип значення, залежно від задачі. Нейронні мережі значною мірою залежать від функцій активації, які використовуються в їхніх нейронах і відіграють вирішальну роль у формуванні поведінки та продуктивності нейронних мереж. У статті представлено всебічний огляд і порівняльний аналіз різних функцій активації, які зазвичай використовуються в глибокому навчанні. Глибоке навчання – це гілка машинного навчання, що використовує нейронні мережі з глибокою архітектурою. У роботі досліджуються різні функції активації (Sigmoid, Tanh, ReLU, LeakyReLU, ELU, SELU, Swish, Mish, Softmax), які використовуються в нейронних мережах. Детально описуються їх математичні властивості, переваги та обмеження кожної функції активації, а також емпіричні дані експериментів, проведених на еталонних наборах даних. Проведені дослідження надають уявлення про вибір та оптимізацію функцій активації для архітектури нейронної мережі.

**Ключові слова:** функції активації, нейронні мережі, глибоке навчання, Sigmoid, Tanh, ReLU, LeakyReLU, ELU, SELU, Swish, Mish, Softmax.

**Москалик Д.О.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

**Антонюк Д.С.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

## ІМОВІРНІСНИЙ РОЗПОДІЛ СКЛАДНОСТІ ВХІДНИХ ЗАДАЧ ДЛЯ ДИСКРЕТНО-ПОДІЙНОГО ТА АГЕНТНО-ОРІЄНТОВАНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

У даній роботі досліджується імовірнісний розподіл складності задач розробки програмного забезпечення шляхом аналізу набору історичних даних розробки програмних проєктів з відкритим вихідним кодом, що входять до фонду “Apache Software Foundation”. На основі гістограми імовірнісного розподілу витраченого часу на задачі по виправленню дефектів, покращенню існуючих функцій та створення нових, перевірена та спростована гіпотеза відповідності фактичного розподілу імовірностей формі логнормального розподілу. Натомість запропоновано та доведено доцільність застосування зворотного розподілу Гауса, що точніше повторює реальний розподіл імовірностей, а також розраховано його числові параметри. Для практичного застосування при низькорівневому моделюванні процесу розробки програмного забезпечення наведено алгоритм генерації значень випадкової величини за даним розподілом. При порівнянні функції густини імовірності зворотного розподілу Гауса з гістограмою фактичного розподілу витраченого часу виявлено аномальне розходження графіків в точці найпоширенішого значення рівного 20 хвилинам. Для компенсації даної аномалії розроблено адаптацію алгоритму імовірнісної генерації складності задач розробки програмного забезпечення, що зберігає оригінальну форму зворотного розподілу Гауса та відтворює аномально високу частоту генерації найпоширенішого значення. Додатково, при аналізі історичних даних виявлено, що більше 99 % значень витраченого часу на одну задачу є кратними 10, що дозволяє модифікувати поточний алгоритм для генерації дискретних значень шляхом округлення згенерованих значень вгору до найближчого числа, кратного 10, що виключає можливість генерації нульових значень та дозволить оптимізувати обчислення при використанні даного алгоритму у відповідних симуляціях. Так як зворотний розподіл Гауса не обмежений максимальним значенням, для запобігання спотворенню результатів симуляції доцільно відкидати всі згенеровані значення більші за певний максимальний поріг, що має визначатись згідно вимог відповідних симуляцій. Таким чином зберігається загальна форма розподілу імовірностей, а сам розподіл обмежений скінченним діапазоном значень.

**Ключові слова:** моделювання, симуляції, складність задач, розробка програмного забезпечення, зворотний розподіл Гауса, логнормальний розподіл, алгоритм.

**Постановка проблеми.** Вибір архітектурної моделі при проєктуванні майбутньої програмної системи є одним з ключових факторів, що визначають можливість успішного завершення даного проєкту та його подальшого ефективного розвитку і підтримки. В сучасному світі при виборі архітектурного підходу найбільша увага приділяється функціональним вимогам до системи та найбільш поширеним нефункціональним вимогам, таким як швидкодія, надійність, безпека, зручність використання тощо. В той же час, ефективність процесу розробки такого програмного продукту зазвичай не враховується через складність її оцінки та відсутність загальновідомих

порівняльних характеристик впливу різних архітектурних підходів на ефективність розробки. Як показало дослідження 5400 IT-проєктів, в середньому великі проєкти перевищують початковий бюджет на 45 %, 7 % затримуються і не встигають завершитись до встановленого кінцевого терміну та містять на 56 % менше функцій, ніж було заплановано від самого початку [1, с. 4].

Проведення масштабного експерименту шляхом розробки однієї і тієї ж програмної системи із застосуванням різних архітектурних підходів для подальшого порівняльного аналізу є недоцільним через його високу вартість та необ'єктивність отриманих результатів вимірювань через різницю



в знаннях та досвіді учасників експерименту, а також неможливості передбачення та виключення будь-яких інших випадкових факторів, що можуть спотворити результат експерименту. Ще одним із можливих шляхів дослідження такого впливу є проведення низькорівневих симуляцій процесів розробки для різних типів архітектури за допомогою дискретно-подійного та агентно-орієнтованого моделювання, що не потребує великих фінансових та часових витрат, а також абсолютно виключає вплив людського фактору на результати вимірювань.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Моделювання різних бізнес-процесів вже давно широко використовується як на практиці, так і в дослідницькій діяльності. Важливість ролі моделювання бізнес-процесів підприємств для їх подальшого вдосконалення та впровадження інновацій підкреслюється в працях Т. Шматковської, Т. Коробчук [2, с. 157], а також А. Сараванос (Saravanos, A.), М. Курінга (Curinga, M.X.) [3, с. 15]. Аналіз наукових досліджень щодо моделювання процесу розробки програмного забезпечення [4, с. 16] виявив тенденції до спаду застосування парадигми системної динаміки та зростання популярності серед науковців дискретно-подійних та агентно-орієнтованих симуляцій, які також виявились найпоширенішими парадигмами.

Різні підходи до моделювання процесу розробки програмного забезпечення висвітлювались в працях вітчизняних науковців, серед яких Ю.С. Кордунова, М. Фелтіновські, О.В. Придатко, О.О. Смотр [5, с. 29], С.Б. Приходько, Н.В. Приходько, К.О. Книрик [6, с. 50], а також іноземними дослідниками, такими як А. Сараванос (Saravanos, A.), М. Курінга (Curinga, M.X.) [3, с. 15]. Однак в даних роботах процес розробки програмного забезпечення моделюється на рівні етапів життєвого циклу програмного проекту, де рівень деталізації ходу виконання робіт недостатній для дослідження впливу програмної архітектури системи на ефективність його розробки.

Теоретичні аспекти низькорівневого моделювання процесу розробки програмного забезпечення, включно з аналізом законів розподілу розміру вхідних задач, були досліджені різними вітчизняними та іноземними науковцями, серед яких І.В. Ярош, Є.В. Павловський, І.А. Назарова [7, с. 80], Ан Джен Чіанг (An Jen Chiang) і Ангус Джіанг (Angus Jeang) [8, с. 2], П.О. Бошар (Bochard, P.O.) і Т. Шварц (Schwarz, T.)

[9, с. 404], Д.О. Москалик і Д.С. Антонюк [10, с. 32], М. Лунесу (Maria Paria Lunesu), Р. Тонеллі (Roberto Tonelli), Л. Маркезі (Lodovica Marchesi), М. Маркезі (Michele Marchesi) [11, с. 134–245]. В різних працях використовуються різні закони розподілу складності задач, такі як нормальний, випадковий, бета-розподіл, ступенева та дрібно-раціональна функції та інші. Проте останнє дослідження історичних записів проєктів з відкритим вихідним кодом [10, с. 32] виявило, що складність задач підпорядковується логнормальному розподілу, але дана гіпотеза ще вимагає підтвердження, а також числові параметри такого розподілу поки не були досліджені. Крім того, логнормальний розподіл не має верхньої межі, що вимагає його адаптації для можливості застосування в симуляції процесу розробки.

**Постановка завдання.** Метою статті є дослідження імовірнісного розподілу складності вхідних задач для дискретно-подійного та агентно-орієнтованого моделювання процесу розробки програмного забезпечення шляхом аналізу фактичного розподілу розміру задач на основі історичних даних проєктів з відкритим вихідним кодом.

**Виклад основного матеріалу.** Для дослідження імовірнісного розподілу складності задач при розробці програмного забезпечення доцільно проаналізувати той самий набір даних “Apache Jira Issue Tracking Dataset” [12], що використовувався для виявлення самого закону логнормального розподілу [10, с. 32]. Даний набір містить історичну інформацію про виконані задачі при розробці програмних проєктів з відкритим вихідним кодом, що належать до фонду “Apache Software Foundation”. Із загальної кількості у більш ніж мільйон різних типів записів, для аналізу розподілу складності практичних задач були обрані лише повністю завершені задачі з інформацією про фактично витрачений час, які мають тип дефекту (“Bug”), покращення існуючої функції (“Improvement”) або створення нової (“New Feature”). Типи записів більш високого (абстрактного) рівня, задачі по тестуванню та створенню документації та інші були виключені з вибірки, оскільки вони або включають в себе, або вже є включеними в задачі обраних типів.

Для більш детального аналізу закону розподілу складності задач розробки є доцільним дослідити розподіл як всіх задач разом, так і окремо кожного з обраних типів задач. На рисунку 1 зображені відповідні гістограми розподілу часу, витраченого на різні типи задач.

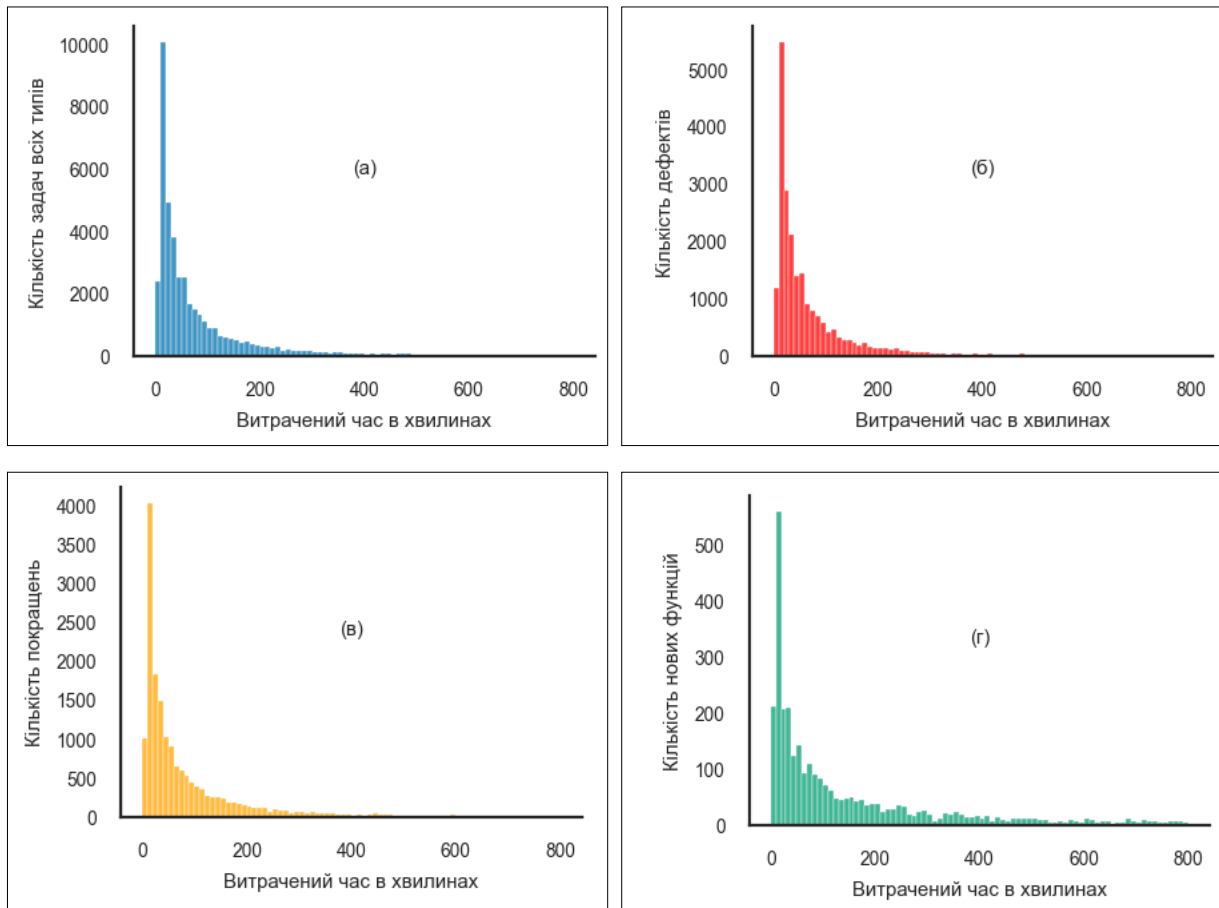


Рис. 1. Гістограми розподілу витраченого часу для (а) всіх типів задач, (б) лише дефектів, (в) покращень та (г) нових функцій

Вищенаведені гістограми мають однакову форму функції розподілу імовірностей незалежно від типу задач, проте для доведення гіпотези саме логнормального розподілу необхідно визначити числові параметри даного розподілу та порівняти графік отриманої функції густини імовірності з фактичними історичними даними.

Логнормальний розподіл випадкової величини  $X$  задається функцією:

$$X = e^{\mu + \sigma Z}, \quad (1)$$

де  $\mu$  та  $\sigma$  – дійсні числа, при чому  $\sigma > 0$ , а  $Z$  – випадкова величина, задана стандартним нормальним розподілом. Параметри розподілу  $\mu$  та  $\sigma$  можна знайти за допомогою методу максимальної правдоподібності [13, с. 332], використовуючи наступні формули:

$$\hat{\mu} = \frac{\sum_k \ln x_k}{n}, \quad \hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_k (\ln x_k - \hat{\mu})^2}{n}}, \quad (2)$$

де  $x_k$  – значення витраченого часу на  $k$ -ту задачу,  $n$  – загальна кількість задач.

Після визначення параметрів розподілу можливий розрахунок таких його числових характеристик, як середнє значення витраченого часу, медіана, мода та дисперсія. Результати розрахунків з точністю до 4 десяткових знаків наведені в таблиці 1.

Виходячи з гістограм на рисунку 1 та обчислених характеристик розподілу з таблиці 1 можна зробити висновок, що розподіли складності дефектів та покращень наближені до загального розподілу всіх типів задач разом, в той час як для задач на розробку нових функцій програмної системи спостерігається більше середнє значення витраченого часу та підвищена імовірність його відхилення в сторону збільшення. З точки зору практичного процесу розробки програмного забезпечення, специфіка роботи над різними типами задач не має суттєвих відмінностей одна від одної, тому для генерації потоку вхідних задач при моделюванні процесу розробки програмного забезпечення достатньо використати параметри імовірнісного розподілу складності для всіх типів задач.

Параметри та характеристики логнормального розподілу складності задач

|                | Параметри розподілу |          | Характеристики розподілу |         |         |             |
|----------------|---------------------|----------|--------------------------|---------|---------|-------------|
|                | $\mu$               | $\sigma$ | Середнє                  | Медіана | Мода    | Дисперсія   |
| Всі типи задач | 3,9687              | 1,0512   | 91,9440                  | 52,9136 | 17,5249 | 17070,9490  |
| Дефекти        | 3,8718              | 0,9600   | 76,1424                  | 48,0269 | 19,1073 | 8774,9768   |
| Покращення     | 4,0020              | 1,0685   | 96,8140                  | 54,7048 | 17,4662 | 19983,3344  |
| Нові функції   | 4,4581              | 1,3645   | 218,9741                 | 86,3193 | 13,4134 | 260621,6962 |

Відповідно до формули 1, окрім обрахованих параметрів логнормального розподілу, для генерації задач різної складності необхідно також мати можливість генерувати значення випадкової величини за стандартним нормальним розподілом. Для цього доцільно використати перетворення Бокса-Мюллера, так як даний підхід є більш обчислювально ефективним за метод зворотного перетворення та алгоритм Зіккурата. Полярна форма перетворення Бокса-Мюллера для моделювання стандартних нормально розподілених випадкових величин [14, с. 281] виглядає наступним чином:

$$R = x^2 + y^2, z_0 = x \cdot \sqrt{\frac{-2 \ln R}{R}}, z_1 = y \cdot \sqrt{\frac{-2 \ln R}{R}}, \quad (3)$$

де  $x$  та  $y$  – незалежні випадкові величини, рівномірно розподілені на інтервалі  $[-1, 1]$ ,  $z_0$  та  $z_1$  – отримані незалежні випадкові величини, розподілені нормально з математичним сподіванням 0 і дисперсією 1, що задовольняє стандартному нормальному розподілу. Якщо при обрахунку значення  $R$  виявиться, що  $R > 1$  чи  $R = 0$ , то значення випадкових величин  $x$  та  $y$  мають бути згенеровані повторно, поки дана умова щодо  $R$  не буде виконана.

На рисунку 2 наведено оригінальну гістограму, побудовану на фактичних історичних даних з вибірки, та гістограму згенерованих випадкових

чисел відповідно до логнормального розподілом з обчисленими параметрами.

З вищенаведених графіків видно, що отриманий розподіл імовірностей має більш пологий спуск, ніж фактичний закон розподілу, що спростовує гіпотезу наявності логнормального розподілу складності задач згідно історичних даних. Враховуючи переважаючу імовірність найчастішого значення витраченого часу на задачу і суттєво менші імовірності сусідніх значень, є доцільним застосувати інший закон розподілу імовірностей, що буде краще відображати розподіл фактичних даних. Серед загально відомих законів розподілу найбільш наближену форму функції густини імовірностей має зворотний розподіл Гауса [15, с. 3], тому варто визначити його параметри і так само порівняти результат з фактичним розподілом складності задач.

Параметри зворотного розподілу Гауса  $\mu$  та  $\lambda$  можуть бути розраховані на основі вибірки даних методом максимальної правдоподібності [16, с. 265] за допомогою наступних формул:

$$\hat{\mu} = \sum_{i=1}^n x_i / n, \quad \hat{\lambda} = n / \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{x_i} - \frac{1}{\hat{\mu}} \right), \quad (4)$$

де  $x_i$  – значення витраченого часу на  $i$ -ту задачу,  $n$  – загальна кількість задач.

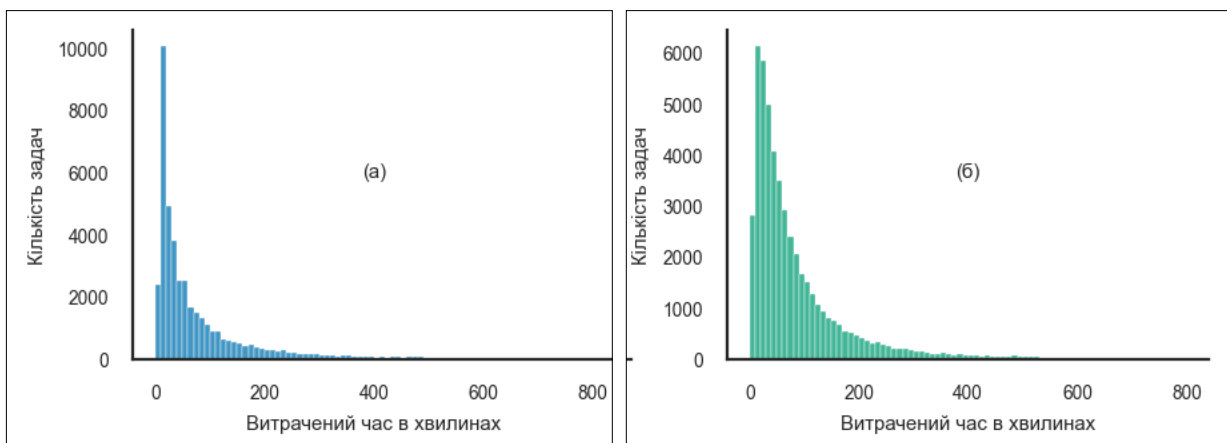


Рис. 2. Гістограми розподілу витраченого часу для (а) фактичних історичних даних, (б) згенерованих випадкових значень

В таблиці 2 наведено розраховані параметри та властивості зворотного розподілу Гауса на основі фактичних даних вибірки з точністю до 4 десяткових знаків.

Таблиця 2  
Параметри та характеристики зворотного розподілу Гауса

| $\mu$    | $\lambda$ | Середнє  | Медіана | Мода    | Дисперсія  |
|----------|-----------|----------|---------|---------|------------|
| 112.8197 | 49.1561   | 113.7829 | 55.1802 | 14.8830 | 29213.0746 |

Для генерації випадкових чисел, що відповідають зворотному розподілу Гауса, можна скористатись наступним алгоритмом [17, с. 89]:

$$x = \mu + \frac{\mu^2 Z^2}{2\lambda} - \frac{\mu}{2\lambda} \sqrt{4\mu\lambda Z^2 + \mu^2 Z^4},$$

$$R = \begin{cases} x, \text{ якщо } U \leq \frac{\mu}{\mu+x} \\ \frac{\mu^2}{x}, \text{ якщо } U > \frac{\mu}{\mu+x} \end{cases}, \quad (5)$$

де  $\mu$  та  $\lambda$  – параметри розподілу,  $Z$  – випадкова величина, задана стандартним нормальним розподілом, що може бути обчислена за формулою 3,  $U$  – випадкова величина, рівномірно розподілена на інтервалі  $[0, 1]$ ,  $R$  – випадкова величина за зворотним розподілом Гауса.

На рисунку 3 зображені функції густини імовірності логнормального та зворотного розподілу Гауса, накладені на гістограму фактичних даних.

Як видно з рисунку 3, зворотний розподіл Гауса краще повторює форму фактичного розподілу даних,

ніж логнормальний, за виключенням аномально високої частоти найпоширенішого значення витраченого часу на одну задачу згідно фактичних даних.

Під час аналізу значень витраченого часу, що найчастіше зустрічаються у поточній вибірці задач із набору історичних даних, було виявлено, що найчастіше значення витраченого часу дорівнює 20 хвилинам, а більше 99 % значень є кратними 10. В таблиці 3 відображені 10 найчастіших значень витрат часу із відповідною кількістю задач із вибірки.

Виходячи з виявленого факту кратності складності задач та властивості неперервності зворотного розподілу Гауса, алгоритм генерації складності можна адаптувати шляхом округлення всіх вихідних значень до найближчого цілого числа, кратного десяти, що є більшим за вхідне дійсне число. Округлення вгору до більшого числа є необхідним, щоб виключити можливість отримання на виході нульової складності задачі та не спотворити розподіл імовірностей.

Враховуючи аномально високу частоту значення витраченого часу у 20 хвилин, що не підпадає під зворотний закон розподілу Гауса, можна скоригувати алгоритм генерації складності задач при моделюванні процесу розробки програмного забезпечення для компенсації даної аномалії. Відповідно до вибірки даних, імовірність найпоширенішого значення дорівнює 23,685 %. Шляхом інтегрування функції розподілу імовірностей зворотного розподілу Гауса з використанням обчислених параметрів на інтервалі  $(10, 20]$  було отримано сумарну імовірність даного діапазону

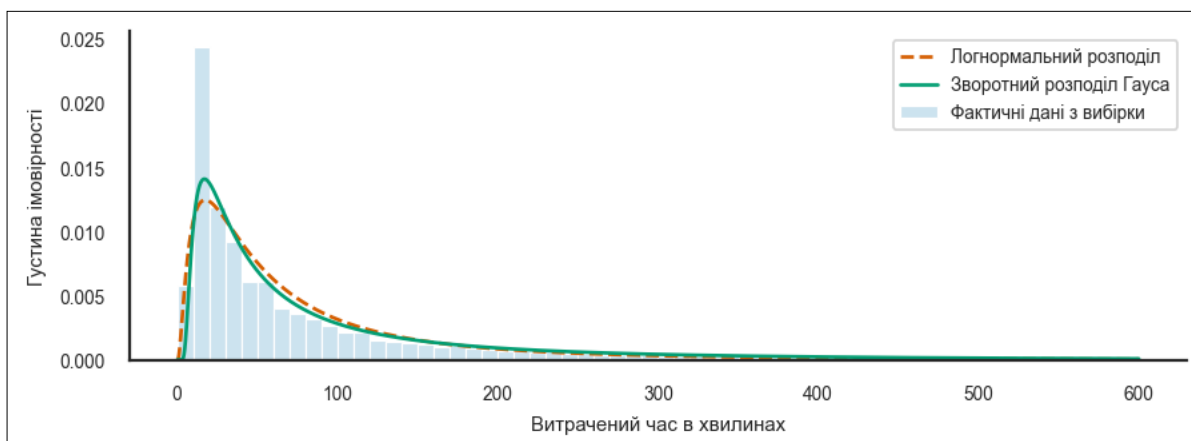


Рис. 3. Відповідність різних розподілів імовірностей фактичному розподілу даних

Таблиця 3

Найчастіші значення витрат часу

| Витрати часу (хв) | 20   | 30   | 40   | 50   | 60   | 10   | 70   | 80   | 90   | 100  |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Кількість задач   | 9974 | 4913 | 3792 | 2494 | 2492 | 2304 | 1639 | 1486 | 1295 | 1085 |

значень 13,2938 %. Таким чином, реальна імовірність даного значення на 10,3912 % більша за імовірність згідно з отриманим розподілом, проте компенсаційну імовірність необхідно обчислити із врахуванням загальної частоти найпоширенішого значення. Отже, для компенсації аномально високої імовірності найпоширенішого значення в 20 хвилин можна застосувати наступні формули:

$$P = \frac{P_D - P_G}{1 - P_G} = 11,9844\%,$$

$$E = \begin{cases} 20, \text{ якщо } U < P \\ R, \text{ якщо } U \geq P \end{cases}, \quad (6)$$

де  $P_D$  – імовірність найпоширенішого значення згідно фактичних даних,  $P_G$  – імовірність найпоширенішого значення згідно отриманого зворотного розподілу Гауса,  $U$  – випадкова величина, рівномірно розподілена на інтервалі  $[0, 1)$ ,  $P$  – компенсаційна імовірність для коригування розподілу,  $R$  – випадкова величина, розподілена за отриманий зворотним розподілом Гауса, що обраховується за формулою 5,  $E$  – випадкова величина згідно адаптованого розподілу складності задач. Гістограма адаптованого розподілу зображена на рисунку 4.

Ще однією особливістю отриманого розподілу, яка заважає моделюванню процесу розробки програмного забезпечення при генерації потоку вхідних задач є те, що графік його функції не обмежений в правій частині. Це може призвести до генерації надмірно великих значень складності задач розробки, що в свою чергу може призвести до спотворення результатів симуляцій, тому доцільно обмежувати максимальне значення складності задач шляхом повторної генерації при виході згенерованого значення за граничну верхню

межу. Найбільше значення витраченого часу на одну задачу у поточній вибірці даних дорівнює 1200 годин, що еквівалентно 150 людино-дням при 8-годинному робочому дні. Задачі такого розміру дійсно зустрічаються на практиці, проте при моделюванні процесу розробки краще задавати граничне значення складності задач в якості параметру моделі, щоб час, необхідний для виконання задачі, не перевищував загальну тривалість періоду часу, що симулюється.

**Висновки.** У даному дослідженні було проаналізовано розподіл складності задач розробки програмного забезпечення шляхом аналізу історичних даних проектів з відкритим вихідним кодом, що входять до фонду “Apache Software Foundation”. Було спростовано гіпотезу щодо відповідності історичних даних логнормальному розподілу імовірностей та запропоновано альтернативу у вигляді зворотного розподілу Гауса, що краще описує розподіл витраченого часу на задачі з набору історичних даних, за виключенням аномально високої фактичної імовірності найпоширенішого значення в 20 хвилин. Для компенсації такої аномалії було запропоновано адаптацію алгоритму імовірнісного розподілу та обчислено відповідні числові параметри, а також запропоновано алгоритм обмеження максимального значення імовірнісного розподілу без спотворення його форми. Отриманий алгоритм розподілу імовірностей для генерації потоку вхідних задач різної складності є наближеним до фактичного розподілу витраченого часу з історичних даних та може бути використаний в низькорівневомих дискретно-подійному чи агентно-орієнтованому моделюванні процесу розробки програмного забезпечення для подальшого його дослідження.

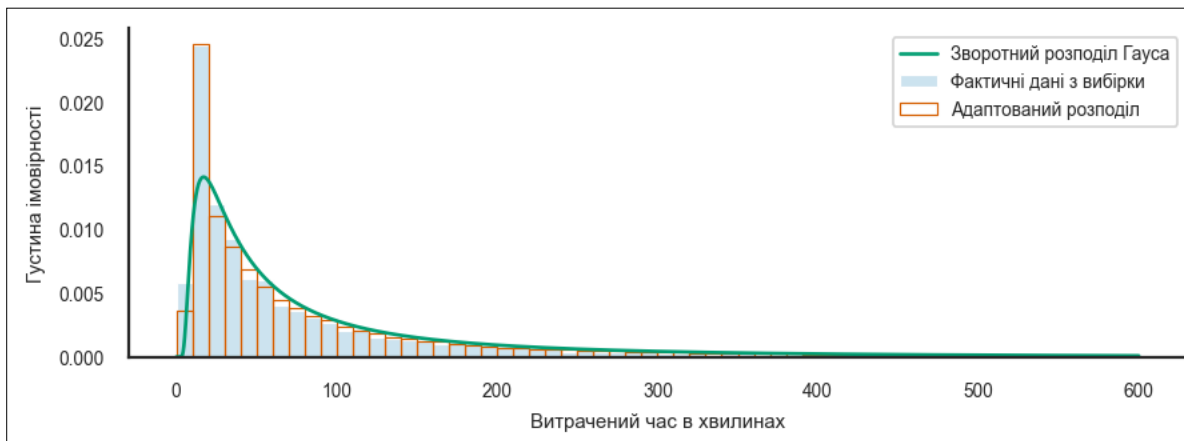


Рис. 4. Порівняння адаптованого розподілу імовірностей з фактичними даними

Список літератури:

1. Bloch, M., Blumberg, S., Laaro, J. Delivering Large-Scale IT Projects on Time, on Budget, and on Value. *Harvard Business Review*. 2012. № 5. P. 2–7.
2. Шматковська Т., Коробчук Т. Сучасні інформаційні та комунікаційні технології в моделюванні бізнес-процесів. *Економічний форум*. 2023. № 1 (3). С. 156–161. DOI: 10.36910/6775-2308-8559-2023-3-20
3. Saravanos, A., Curinga, M.X. Simulating the Software Development Lifecycle: The Waterfall Model. *Applied System Innovation*. 2023. № 6. P. 108. DOI: 10.3390/asi6060108
4. J.A. García-García, J.G. Enriquez, M. Ruiz, C. Arévalo, A. Jiménez-Ramírez Software Process Simulation Modeling: Systematic literature review. *Computer Standards & Interfaces*. 2020. Volume 70. P. 103425. DOI: 10.1016/j.csi.2020.103425
5. Кордунова Ю.С., Фелтіновські М., Придатко О.В., Смотр О.О. Математичне моделювання процесу розробки спеціалізованих програмних систем безпеко-орієнтованого спрямування. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2023. № 27. С. 23–31. DOI: 10.32447/20784643.27.2023.03
6. Приходько, С. Б., Приходько, Н. В., & Книрик, К. О. Математичне моделювання трудомісткості розробки мобільних застосунків у фазі планування із врахуванням викидів. *Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем* : матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції. м. Дніпро, 6–8 листопада 2019 р. / Український державний хіміко-технологічний університет. Дніпро, 2019. С. 50.
7. Ярош, І.В, Павловський Є.В., Назарова І.А. Математичне моделювання процесу прогнозування витрат часу на розв'язання типової задачі з розробки програмного забезпечення. *Наукові праці ДонНТУ. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка*. 2023. № 35-36. С. 79–84.
8. An Jen Chiang & Angus Jeang. Stochastic project management via computer simulation and optimisation method. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*. 2015. Vol 2. Issue 4. P. 211–230. DOI: 10.1080/23302674.2015.1025889
9. Bochar, P. O., & Schwarz, T. Evaluation of mean and variance approximations in three point estimation of task completion times using the beta and the Kumaraswamy distribution. *International Journal of Information Technology and Management*. 2019. Vol. 18. Issue 4. P. 389–406. Inderscience Publishers. DOI: 10.1504/ijitm.2019.103053
10. Москалик Д.О., Антонюк Д.С. Аналіз розподілу складності задач при розробці програмного забезпечення з відкритим вихідним кодом. *Сучасні комп'ютерні системи та мережі в управлінні* : матеріали VI Всеукраїнської наук.-практ. Інтернет-конф. здобувачів вищої освіти та молодих вчених, м. Хмельницький, м. Херсон, 30 листопада 2023 р. / Херсонський національний технічний університет. Херсон, 2023. С. 31–32.
11. M. I. Lunesu, R. Tonelli, L. Marchesi and M. Marchesi. Assessing the Risk of Software Development in Agile Methodologies Using Simulation. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 134240–134258. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3115941
12. Diamantopoulos Themistoklis, Dimitrios-Nikitas Nastos and Symeonidis Andreas. Apache Jira Issue Tracking Dataset. Zenodo. Mar. 17, 2023. DOI: 10.5281/zenodo.7740379
13. D. E. Kline, D. A. Bender. MAXIMUM LIKELIHOOD ESTIMATION FOR SHIFTED WEIBULL AND LOGNORMAL DISTRIBUTIONS. *Transactions of the ASAE*. 1990. № 33 (1). P. 330–335. DOI: 10.13031/2013.31334
14. Knop, R. Remark on algorithm 334 [G5]: normal random deviates. *Communications of the ACM*. 1969. № 12 (5). P. 281. DOI: 10.1145/362946.362996
15. Giner, G. and Smyth, G., K. Statmod: Probability calculations for the inverse gaussian distribution. *The R Journal*. 2016. № 8 (1). P. 339–351. DOI: 10.32614/rj-2016-024
16. J. L. Folks, R. S. Chhikara. The Inverse Gaussian Distribution and its Statistical Application – A Review. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*. 1978. Volume 40, Issue 3. P. 263–275. DOI: 10.1111/j.2517-6161.1978.tb01039.x
17. Michael, J. R., Schucany, W. R., Haas, R. W. Generating Random Variates Using Transformations with Multiple Roots. *The American Statistician*. 1976. № 30 (2). P. 88–90. DOI: 10.1080/00031305.1976.10479147

**Moskalyk D.O., Antoniuk D.S. PROBABILITY DISTRIBUTION OF INPUT TASKS COMPLEXITY FOR DISCRETE-EVENT AND AGENT-BASED SOFTWARE DEVELOPMENT PROCESS MODELING**

*This paper explores the probability distribution of the software development tasks complexity by analyzing a set of historical data on the development of open-source software projects included in the Apache Software Foundation. Based on the histogram of the probability distribution of the time spent on the task of correcting defects, improving existing functionality, and creating new features, the hypothesis that the actual probability*

*distribution conforms to the form of a lognormal distribution was checked and rejected. Instead, the inverse Gaussian distribution was proposed, proved that it better reflects the real probability distribution and its numerical parameters have been calculated. For practical application in low-level modeling of the software development process, an algorithm for generating random values from the given distribution has been provided. During a comparison of the inverse Gaussian distribution probability density function with the histogram of the actual time spent, an anomalous graphs divergence was noticed at the point of the most common value equal to 20 minutes. To compensate this anomaly, an adaptation of the algorithm for probabilistic generation of the software development tasks complexity has been developed, which preserves the original shape of the inverse Gaussian distribution and replicates the abnormally high frequency of the most common value. Additionally, during an analysis of the historical data, it was encountered that more than 99 % of the values of the time spent on one task are multiples of 10, which allows modifying the current algorithm for generating discrete values by rounding the generated values up to the nearest multiple of 10, which eliminates the possibility of generating zero values and allows to optimize calculations when using this algorithm in the corresponding simulations. Since the inverse Gaussian distribution is not limited at the right side, to prevent distortion of the simulation results, it is advisable to discard all generated values greater than a certain maximum threshold, which should be determined according to the requirements of the corresponding simulations. In this way, the general form of the probability distribution is preserved, and the distribution itself is limited to a finite range of values.*

**Key words:** modeling, simulation, task complexity, software development, inverse Gaussian distribution, lognormal distribution, algorithm.

***Oleshchenko L.M.***

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

***Zheng Jinsong***

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

## **LSTM NEURAL NETWORK IMPLEMENTATION FOR THE STOCK MARKET OPERATIONS PREDICTING**

*The stock market is an essential part of the modern financial system. Analyzing and forecasting trends in the stock market can effectively help investors avoid investment risks and increase profits. The stock index reflects changes in the stock market and can indicate market trends. Time series forecasting in the stock market is a relevant research direction among investors and researchers. Traditional statistical models are widely used in time series forecasting tasks of stock market data. Due to the nonlinear characteristics of time series data, traditional statistical models have certain limitations and forecasting problems. Machine learning models can effectively address nonlinear problems in time series data. With the development of machine learning models, deep learning models such as artificial neural networks have begun to be widely used in forecasting time series for stock market data.*

*The article analyzes the use of recurrent neural networks for forecasting operations in the stock market. The main advantages and disadvantages of existing solutions are provided. The proposed software architecture and key technologies for forecasting operations in the stock market are described, including the description of the developed software, its main modules, and components. The functional capabilities of the developed software product are outlined. The effectiveness of the proposed software method using LSTM neural network for forecasting operations in the stock market is analyzed.*

*The proposed software implements the LSTM neural network training method to improve the accuracy of forecasting financial operations in the stock market. According to the conducted research, the use of LSTM can increase the accuracy of forecasting operations in the stock market by up in average to 15 % compared to using the ARMA model. The developed software in the Python programming language, along with machine learning libraries and modules, allows obtaining relatively accurate forecasting results compared to using known statistical methods.*

**Key words:** *software, neural networks, ARMA, ANN, RNN, LSTM, Python, TensorFlow, stock market operations forecasting.*

**Problem statement.** Stocks, originating from the Dutch East India Company in 1611, symbolize ownership in companies and are key assets for investors, offering both high risks and potential returns. Stock markets worldwide generate vast data daily, crucial for investors' decision-making. However, predicting stock prices is complex due to factors like noise, non-linearity, and unpredictable investor behavior.

Challenges in forecasting include noise in data, nonlinearity, overfitting, dynamic market conditions, and the need for advanced algorithms. Adapting to evolving market dynamics, limited historical data availability, model complexity, and external factors like unethical practices or global events further complicate predictions. Overcoming these challenges necessitates advanced modeling, rigorous data preprocessing, continuous refinement, and deep market understanding.

**The main goal of the article** is creating software to predict stock market prices and obtain more accurate results.

**Related research.** The article [1] explores the use of LSTM networks to predict future stock price trends based on historical prices and technical indicators, achieving promising results in predicting stock price movements. The paper [2] proposes an LSTM-based RNN for forecasting future values of GOOGL and NKE assets, showing promising results in tracing opening prices, with future work aimed at optimizing data length and training epochs to improve prediction accuracy. The article [3] concludes that the CEEMDAN-LSTM mixture model optimally forecasts stock index prices for both the S&P 500 and CSI 300 indices, outperforming other models such as SVM, BP, Elman network, and WAV combined with CEEMDAN. Stock market prediction is a complex task in financial



research, tackled through various methodologies like fundamental and technical analysis. Fundamental analysis examines economic, political, company-specific, and psychological factors influencing stock prices. Economic indicators and political stability impact stock markets significantly, while company profitability and industry development also play crucial roles. Technical analysis relies on quantitative indicators like price and volume, emphasizing market rules and short-term trends. Investor behavior, influenced by herd mentality and reflexivity theory, further complicates predictions. Manipulation by market makers, bubbles, and panic selling add layers of complexity. Historical data analysis is vital for understanding market trends and patterns, guiding accurate predictions [4–7].

**Existing software solutions.** Stock market technical methods are broadly categorized into traditional statistical and machine learning approaches. Time series data, organized in chronological order, is fundamental for time series forecasting, which aims to predict future trends based on historical data. Traditional statistical methods like ARMA and ARIMA are well-established, while machine learning methods like support vector machines (SVM) and neural networks are increasingly popular due to their effectiveness and generalization capabilities. Statistical prediction models encompass various techniques tailored for different types of variables, such as categorical, ordinal, interval, and ratio variables. Regression analysis, moving average, cyclical change analysis, and seasonal change analysis are common statistical methods used for stock market prediction. These methods aim to model and forecast stock price trends, but each has its limitations and challenges, such as the need for data preprocessing and the suitability for non-linear time series like stock prices [8].

Machine learning models excel in handling non-linear stock data compared to traditional statistical methods. As a rapidly growing branch of artificial intelligence, machine learning has evolved significantly from symbolic learning to statistical learning. It focuses on enhancing system performance across various fields like medicine, biology, and economics. Different machine learning algorithms are employed based on the research objectives, such as decision trees and Bayesian classifiers for classification tasks and linear regression and neural networks for regression tasks. Additionally, machine learning algorithms are categorized into supervised learning, which uses labeled training data, and unsupervised learning, which doesn't require labeled

information, with examples including classification and regression for supervised learning and clustering for unsupervised learning [9].

LSTM networks excel in predicting stock market operations due to their unique ability to capture long-term dependencies in sequential data. Unlike traditional neural networks, LSTMs can effectively model complex and non-linear patterns over extended periods, making them well-suited for financial time series analysis. Analyzing stock market transactions provides valuable insights into market trends and investor sentiment, with the increasing volume of electronic trades generating substantial big data. LSTM networks offer promising prospects for accurately predicting stock market movements by leveraging their superior performance in handling temporal dynamics and incorporating historical information. As financial markets evolve, LSTM networks continue to demonstrate their effectiveness in forecasting stock market behavior, making them a preferred choice for researchers and practitioners seeking robust predictions. Ongoing advancements in deep learning further enhance the capabilities of LSTM networks, ensuring their relevance in stock market forecasting [10].

Decision support methods in stock market operations aid investors, traders, and financial professionals in making informed decisions. They encompass fundamental analysis, technical analysis, algorithmic trading, and sentiment analysis.

Fundamental analysis evaluates a company's financial health and intrinsic value, while technical analysis forecasts price movements using historical data and statistical tools. Algorithmic trading automates trading decisions using computer algorithms based on various strategies. Sentiment analysis assesses market sentiment by analyzing news, social media, and other sources, employing NLP and machine learning. Implementing NLP-driven insights into trading systems enhances decision-making, providing actionable information for investors.

Machine learning models, like neural networks, SVM, and decision trees, are increasingly used for predicting stock prices. These methods, often used together, depend on investor preferences and market conditions, with technology advancements continuously enhancing decision support tools.

**Data sources and data preprocessing.** In empirical research, data quality significantly impacts results. Data collection methods include statistical surveys and scientific empirical methods. Authenticity is ensured by sourcing data from Yahoo Finance.

This research uses five years of real historical time series data from NASDAQ Index ETF, S&P 500 Index ETF, and DOW JONES Index ETF, from September 1st, 2018, to September 1st, 2023. Data preprocessing involves reviewing data for completeness and accuracy, dealing with missing values, and standardizing data.

If too many missing values exist, a threshold can be set, and attributes exceeding it may be deleted. Alternatively, missing numeric values can be filled using averages, while non-numeric ones can be filled with the mode. Linear interpolation can fill missing values based on fitted linear relationships, but it may not be suitable for data at the beginning or end of a sample, where alternative methods like mean filling may be considered.

Data standardization aims to clarify variable relationships and enhance comparability by scaling data within a specific interval. Common methods include min-max, *log* function, *atan* function, and *z*-score standardization. Each method affects model results differently, and selection depends on data and model conditions. Standardization benefits model convergence speed and accuracy.

This research adjusts data to the range of 0 to 1 using standardization due to the sensitivity of the deep learning model framework to input data. The most common method is min-max standardization, which linearly transforms data to fit within [0,1], retaining original data correlations but with some limitations.

If new original data needs to be added in the experiment, this method has a certain probability of causing its maximum and minimum values to change, so it needs to be re-perform definitions and calculations:

$$y_i = \frac{x_i - \min_{1 \leq j \leq n} \{x_j\}}{\max_{1 \leq j \leq n} \{x_i\} - \min_{1 \leq j \leq n} \{x_j\}}, \quad (1)$$

where *max* is the maximum value in the sample data, and *min* is the minimum value in the sample data.

Log function conversion method uses the log function with base 10 to transform data, with the goal of achieving normalization. This method is one of the most commonly used methods in linear regression and data regression research. The specific formula is as shown below:

$$X = \log_{10}(x). \quad (2)$$

In the *z*-score standardization method, if all data do not need to be mapped to the interval [0,1], then the most common method is *z*-score standardization, also called standard deviation standardization. The formula is shown below.

$$y_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s}, \quad (3)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (4)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (5)$$

This method normalizes the original data to new data using *z*-score. After converting the original sequence, the new sequence  $y_1, y_2, \dots, y_n$  formed after  $x_1, x_2, \dots, x_n$  changes has a mean of 0, a variance of 1, and no dimension. This is because  $x - \bar{x}$  only changes the mean of the data, while the standard deviation remains the same. Logistic transformation uses the logistic function to transform data. The function of the logistic function is to make the data tend to 0 in the interval from negative infinity to 0, and tend to 1 in the interval from 0 to positive infinity. The logistic function is as shown in the following formula.

$$y_i = \frac{1}{(1 + e^{-x_i})}. \quad (6)$$

In this research, the data is standardized by using the “min-max data standardization method” in the data preprocessing stage.

The LSTM deep learning model framework in this study requires standardized data for accurate predictions. Python 3.11.5 is utilized, employing the *MinMaxScaler* preprocessing class from the Scikit-learn library for data normalization. Python offers versatile tools for data handling, including Pandas for efficient data manipulation and Scikit-learn for scaling and preprocessing tasks. These libraries empower data scientists to seamlessly explore and prepare datasets, facilitating subsequent analysis and machine learning tasks.

**Proposed software method.** In the research we build LSTM model to predict stock price of sample data. The LSTM model is mainly designed to solve the problems of gradient disappearance and gradient explosion during long sequence training. It is so far the best model for time series prediction among deep learning methods (Fig. 1).

We build the LSTM model framework based on the LSTM layer, Dropout layer and Dense layer in the neural network. In the experiment of this research, the Keras deep learning framework is used to build the framework.

First, we use the Keras deep learning framework to build a Sequential model; secondly, add the LSTM layer, Dropout layer and Dense layer in the neural network to the model in sequence, and set

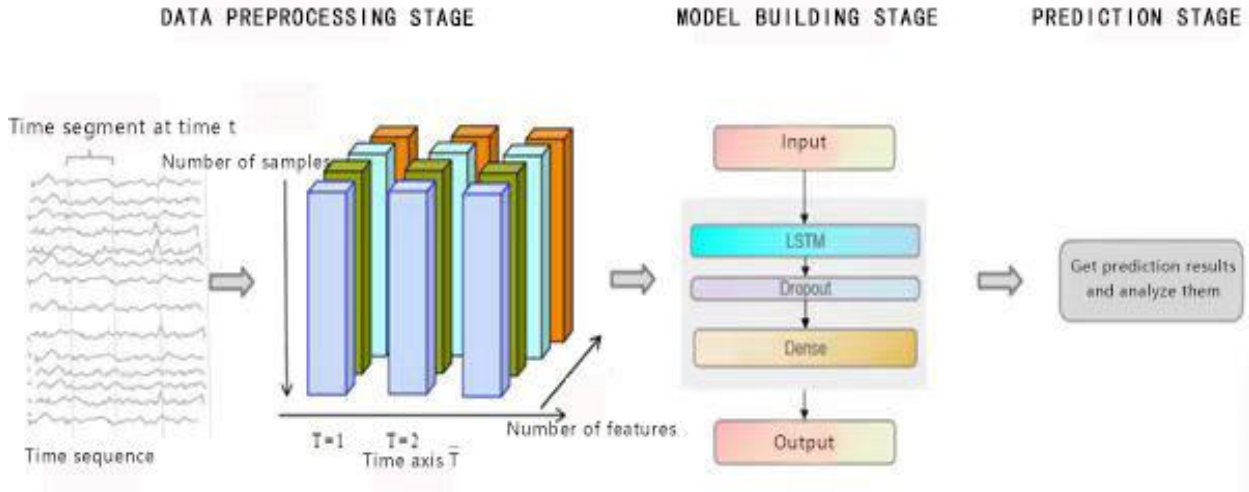


Fig. 1. LSTM model usage to predict stock price of sample data

the parameters of each layer. Among them, the activation function uses Relu function to optimize the framework. The algorithm adopts Adam algorithm.

The Keras sequential model allows us to specify a neural network, precisely, sequential: from input to output, passing through a series of neural layers, one after the other. TensorFlow also allows to use the functional API for building deep learning models. A Sequential model is appropriate for a plain stack of layers where each layer has one input tensor and one output tensor.

This research aims to build a deep learning model LSTM framework to predict time series data of Exchange-Traded Fund stock index (ETF). In order to effectively verify the accuracy of the framework established in this research in the index return prediction problem, this research selects three different stock index ETF sample data in the same time period to test the model, namely, the NASDAQ Index ETF, the S&P 500 Index ETF, and the Dow Jones Index ETF.

In order to better evaluate the prediction accuracy of each model, this research uses two evaluation indicators: MAE (mean absolute error) and RMSE (root mean square error). The formulas of each evaluation index are as follows:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|, \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}, \quad (8)$$

where  $y_i$  represents the real value of the index ETF in the  $i$ -th period,  $\hat{y}_i$  represents the predicted value of the index ETF in the  $i$ -th period.

RMSE is the operation of squaring and accumulating errors and then taking the square root.

Therefore, RMSE actually magnifies the gap between errors, while MAE can reflect a more realistic error situation.

The results of the two evaluation indicators RMSE and MAE are that, the smaller the number, the better the prediction effect of the model and the higher the accuracy of the model.

This research selects five years NASDAQ Index ETF (ticker symbol: QQQ), S&P 500 Index ETF (ticker symbol: SPY), and DOW JONES Index ETF (ticker symbol: DIA) stock market closing prices time series data as sample data.

We divide the three sample data into a training set and a test set. The training set is used to learn the potential rules, the test set is to test the model trained on the training set in the new sample of the test set to judge the model's ability to discriminate new samples. The method of dividing the training set and the test set of the exponential sample in this research keeps consistent. The first 80 % of the time series data is used as the training set, and the last 20 % of the time series data is used as the test set.

In the model building stage, this research uses the Keras deep learning framework to build the LSTM model. The specific methods are as follows.

First, we build a Sequential model in the Keras deep learning framework.

Second, we add the necessary neural network layers to the Sequential model in sequence. These include LSTM model layer, Dropout layer and Dense layer.

In the hidden layer, there are a total of 64 neurons, the output layer is set to 1 neuron, and the input variables are features of one time step ( $t-1$ ).

The default parameter settings are as follows: dropout\_ratio in the Dropout layer is 0.5, the output space dimension of the Dense layer is 2, the input

space dimension of the LSTM layer is 100, the optimization function is Adam, and the loss function is Mean Absolute Error (MAE).

We import all the required libraries. yFinance is an open-source Python library that allows to acquire stock data from Yahoo Finance.

```

1 import math
2 import yfinance as yf
3 import numpy as np
4 import pandas as pd
5 import matplotlib.pyplot as plt
6 import tensorflow as tf
7 from sklearn.preprocessing import MinMaxScaler
8 from tensorflow import keras
9 from tensorflow.keras import layers
    
```

NASDAQ Index ETFs replicate the NASDAQ stock market's performance, known for its focus on tech and growth companies. They offer diversified exposure to NASDAQ's stocks without buying individual ones. These ETFs, like Invesco QQQ Trust (ticker: QQQ), track NASDAQ indices and are traded on stock exchanges.

Similarly, S&P 500 Index ETFs, such as SPY, mirror the S&P 500's performance, representing 500 large-cap US companies. They provide diversified market exposure without buying individual stocks. DOW JONES INDEX ETFs, like DIA, mimic the Dow Jones Industrial Average's performance, consisting of 30 large US companies. They offer exposure to the DJIA's performance without buying its individual stocks.

In the research, we explore the relationship between length of time period and accuracy of prediction, and the relationship between data volatility and accuracy of prediction. Therefore, we use 6 months, 1 year, 3 years and 5 years four

different time periods to test the relationship (Table 1).

The relationship between the length of time and prediction accuracy is nuanced and depends on various factors. Successful prediction strategies often involve a combination of models tailored to different time horizons, considering the specific characteristics and challenges associated with each. The choice of features, model architecture, and the incorporation of external factors play crucial roles in determining the effectiveness of predictions across different timeframes.

**Research results.** For the research we select five years (from September 1, 2018 to September 1, 2023) NASDAQ Index ETF (ticker symbol: QQQ), S&P 500 Index ETF (ticker symbol: SPY), and DOW JONES Index ETF (ticker symbol: DIA) stock market closing prices time series data as sample data to implement LSTM model. We use the yFinance method to acquire the stock data starting from September 1, 2018 to September 1, 2023 and then preview the data:

```

10 stock_data = yf.download('QQQ', start='2018-09-01', end='2023-
11 stock_data.head( )
    
```

Table 1

**Research time periods to test the relationship between data volatility and accuracy of prediction**

| Stock symbol              | Time length | Time range            |
|---------------------------|-------------|-----------------------|
| NASDAQ INDEX ETF (QQQ)    | 6 months    | 01/03/2023-01/09/2023 |
|                           | 1 year      | 01/09/2022-01/09/2023 |
|                           | 3 years     | 01/09/2020-01/09/2023 |
|                           | 5 years     | 01/09/2018-01/09/2023 |
| S&P 500 INDEX ETF (SPY)   | 6 months    | 01/03/2023-01/09/2023 |
|                           | 1 year      | 01/09/2022-01/09/2023 |
|                           | 3 years     | 01/09/2020-01/09/2023 |
|                           | 5 years     | 01/09/2018-01/09/2023 |
| DOW JONES INDEX ETF (DIA) | 6 months    | 01/03/2023-01/09/2023 |
|                           | 1 year      | 01/09/2022-01/09/2023 |
|                           | 3 years     | 01/09/2020-01/09/2023 |
|                           | 5 years     | 01/09/2018-01/09/2023 |

Code running result as below:

| Date       | Open       | High       | Low        | Close      | Adj Close  | Volume   |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| 2018-09-04 | 186.080002 | 186.399994 | 184.850006 | 185.850006 | 179.448425 | 29063500 |
| 2018-09-05 | 185.520004 | 185.550003 | 182.820007 | 183.449997 | 177.131104 | 42623300 |
| 2018-09-06 | 183.529999 | 183.750000 | 180.580002 | 181.809998 | 175.547607 | 46091400 |
| 2018-09-07 | 180.500000 | 182.669998 | 180.440002 | 181.110001 | 174.871719 | 46629500 |
| 2018-09-10 | 182.149994 | 182.250000 | 180.729996 | 181.720001 | 175.460678 | 26132000 |

| Date       | Open       | High       | Low        | Close      | Adj Close  | Volume   |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| 2018-09-04 | 186.080002 | 186.399994 | 184.850006 | 185.850006 | 179.448425 | 29063500 |
| 2018-09-05 | 185.520004 | 185.550003 | 182.820007 | 183.449997 | 177.131104 | 42623300 |
| 2018-09-06 | 183.529999 | 183.750000 | 180.580002 | 181.809998 | 175.547607 | 46091400 |
| 2018-09-07 | 180.500000 | 182.669998 | 180.440002 | 181.110001 | 174.871719 | 46629500 |
| 2018-09-10 | 182.149994 | 182.250000 | 180.729996 | 181.720001 | 175.460678 | 26132000 |

We set the plot figure size and title, use the Matplotlib plot method to create a line chart for historical close prices of QQQ, in the code lines 15–16 we set the x-axis and y-axis labels:

```

12 plt.figure(figsize=(15, 8))
13 plt.title('Stock Prices History')
14 plt.plot(stock_data['Close'])
15 plt.xlabel('Date')
16 plt.ylabel('Prices ($)')
    
```

Code running result as below (Fig. 2):

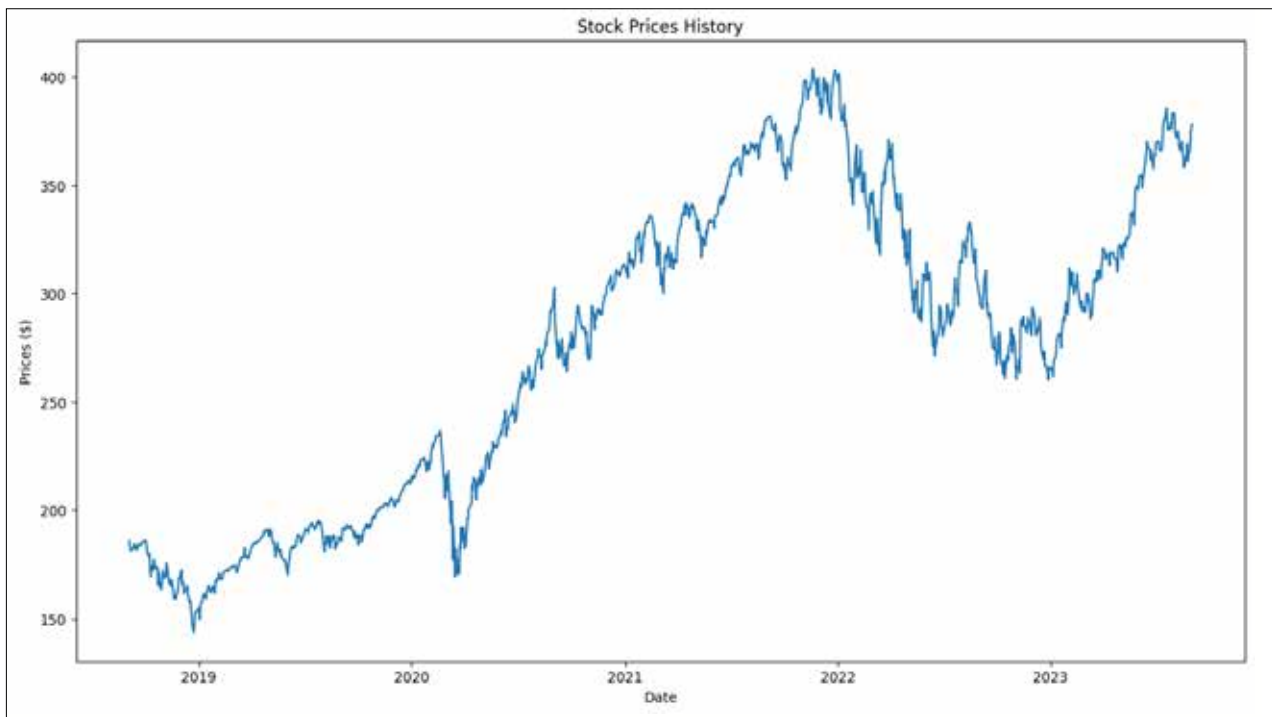


Fig. 2. The line chart for historical close prices of QQQ

We extract the closing prices from the acquired stock data and convert it to a number series, calculate the data size for 80 % of the dataset. The *math.ceil* method is to ensure the data size is rounded up to an

integer. We use the Scikit-Learn *MinMaxScaler* to normalize all stock data ranging from 0 to 1. We also reshape our normalized data into a two-dimensional array:

```
17 close_prices = stock_data['Close']
18 values = close_prices.values
19 training_data_len = math.ceil(len(values)* 0.8)

20 scaler = MinMaxScaler(feature_range=(0,1))
21 scaled_data = scaler.fit_transform(values.reshape(-1,1))
22 train_data = scaled_data[0: training_data_len, :]

23 x_train = []
24 y_train = []

25 for i in range(60, len(train_data)):
26     x_train.append(train_data[i-60:i, 0])
27     y_train.append(train_data[i, 0])

28 x_train, y_train = np.array(x_train), np.array(y_train)
29 x_train = np.reshape(x_train, (x_train.shape[0],
    x_train.shape[1], 1))
```

In the code line 22 we set apart the first 80 % of the stock data as the training set. Code lines 23–24 create an empty list for a sequence of feature data (*x\_train*) and a sequence of label data (*y\_train*).

Code lines 25–27 create a 60-days window of historical prices (*i-60*) as our feature data (*x\_train*) and the following 60-days window as label data (*y\_train*).

Code lines 28–29 convert the feature data (*x\_train*) and label data (*y\_train*) into Numpy array as it is the data format accepted by the Tensorflow when training a neural network model. Reshape again the *x\_train* and *y\_train* into a three-dimensional array as part of the requirement to train a LSTM model.

Then we extract the closing prices from our normalized dataset (the last 20 % of the dataset):

```
30 test_data = scaled_data[training_data_len-60: , : ]
31 x_test = []
32 y_test = values[training_data_len:]

33 for i in range(60, len(test_data)):
34     x_test.append(test_data[i-60:i, 0])

35 x_test = np.array(x_test)
36 x_test = np.reshape(x_test, (x_test.shape[0], x_test.shape[1],
    1))
```

Code lines 31–34: similar to the training set, we will have to create feature data (*x\_test*) and label data (*y\_test*) from our test set.

Code lines 35–36 convert the feature data (*x\_test*) and label data (*y\_test*) into Numpy array. Reshape again the *x\_test* and *y\_test* into a three-dimensional array.

We define a Sequential model which consists of a linear stack of layers and add a LSTM layer by giving it 100 network units, set the *return\_sequence* to true so that the output of the layer will be another sequence of the same length (code lines 37–38):

```
37 model = keras.Sequential()
38 model.add(layers.LSTM(100, return_sequences=True,
    input_shape=(x_train.shape[1], 1)))
```

We add another LSTM layer with also 100 network units. But we set the *return\_sequence* to false for this time to only return the last output in the output sequence length (code line 39):

```
39 model.add(layers.LSTM(100, return_sequences=False))
40 model.add(layers.Dense(25))
41 model.add(layers.Dense(1))
42 model.summary()
```

```

Model: "sequential"
-----
Layer (type)                Output Shape              Param #
-----
lstm (LSTM)                  (None, 60, 100)          40800
lstm_1 (LSTM)                (None, 100)              80400
dense (Dense)                (None, 25)               2525
dense_1 (Dense)              (None, 1)                26
-----
Total params: 123751 (483.40 KB)
Trainable params: 123751 (483.40 KB)
Non-trainable params: 0 (0.00 Byte)

```

**Fig. 3. The summary of LSTM neural network**

Code line 40 adds a densely connected neural network layer with 25 network units. Code line 41 at last, adds a densely connected layer that specifies the output of 1 network unit. Code line 42 shows the summary of our LSTM neural network. Code running result as below (Fig. 3).

Then we adopt Adam optimizer and set the mean square error as loss function and train the model by fitting it with the training set. We try with batch\_size of 1 and run the training for 3 epochs (code lines 43–44):

```

43 model.compile(optimizer='adam', loss='mean_squared_error')
44 model.fit(x_train, y_train, batch_size= 1, epochs=3)

```

Code running result as below (Fig. 4).

```

Epoch 1/3
946/946 [=====] - 40s 37ms/step - loss: 0.0035
Epoch 2/3
946/946 [=====] - 36s 39ms/step - loss: 0.0015
Epoch 3/3
946/946 [=====] - 35s 37ms/step - loss: 0.0012
<keras.src.callbacks.History at 0x781fac6ffeb0>

```

**Fig. 4. The training for 3 epochs**

We apply the model to predict the stock prices based on the test set and use the inverse\_transform method to denormalize the predicted stock prices (code lines 45–46):

```

45 predictions = model.predict(x_test)
46 predictions = scaler.inverse_transform(predictions)
47 rmse = np.sqrt(np.mean(predictions - y_test)**2)
48 print("RMSE=", rmse)
49 mae = np.mean(np.abs(predictions - y_test))
50 print("MAE=", mae)
51 daily_volatility = np.std(predictions)
52 print("daily_volatility=", daily_volatility)
53 count = np.size(predictions)
54 print("count=", count)
55 volatility = daily_volatility * np.sqrt(count)
56 print("Volatility=", volatility)

```

Code lines 47–48 apply the RMSE formula to calculate the degree of discrepancy between the predicted prices and real prices ( $y_{test}$ ) and display the result. Code lines 49–50 apply the MAE formula to calculate the degree of discrepancy between the

predicted prices and real prices ( $y_{test}$ ) and display the result. Code lines 51–56 apply the volatility formula to calculate the volatility of stock prices based on the test set and display the result.

Code running result as below (Fig. 5).

```
8/8 [=====] - 1s 32ms/step
RMSE= 9.1085936060445718
MAE= 31.6988327615506
daily_volatility= 33.66907
count= 251
Volatility= 533.4184053639773
```

Fig. 5. The volatility of stock prices based on the test set

We use the *filter* method to only retain the closing price column in the dataframe and split our stock data into three plotting regions: training, validation and prediction (code lines 57–60):

```
57 data = stock_data.filter(['Close'])
58 train = data[:training_data_len]
59 validation = data[training_data_len:]
60 validation['Predictions'] = predictions
61 plt.figure(figsize=(16,8))
62 plt.title('Model')
63 plt.xlabel('Date')
64 plt.ylabel('Close Price USD ($)')
65 plt.plot(train)
66 plt.plot(validation[['Close', 'Predictions']])
67 plt.legend(['Train', 'Val', 'Predictions'], loc='lower right')
68 plt.show()
```

Code lines 61–68 configure the chart figure size, title, x-axis & y-axis label. Code running result as below (Fig. 6).

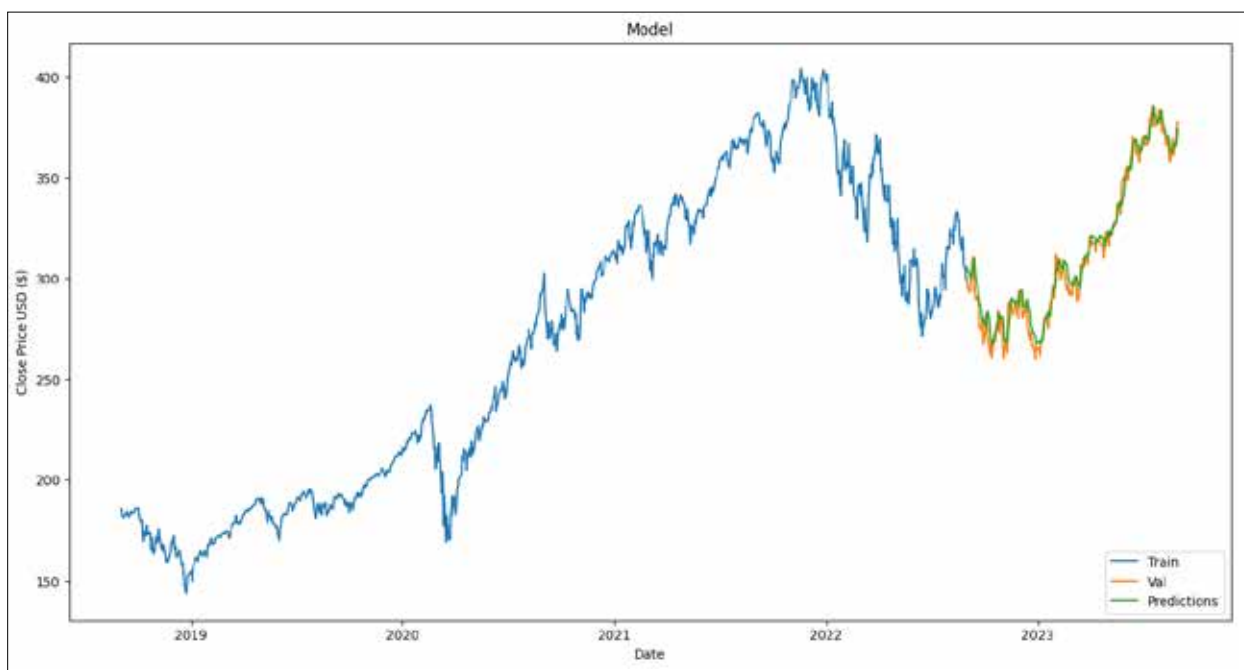


Fig. 6. Training, validation and prediction for closing price



In the research we compare results between a classic ARMA (Auto Regressive Integrated Moving Average) model and LSTM model.

The difference in performance between a classic ARMA model and an LSTM model for prediction can vary significantly depending on the specific dataset, the characteristics of the time series, and the quality of the features used (Table 2).

To compare the ARMA and LSTM models, we split the dataset into training and testing sets, train both models, and evaluate their performance using Mean Squared Error and Mean Absolute Error metrics. The choice between models depends on the data's characteristics, with ARMA suitable for linear, stationary series and LSTM for more complex patterns. Empirical testing is crucial for a reliable comparison. Using LSTM can enhance stock

market forecasting accuracy by up in average to 15 % due to its ability to capture complex patterns and handle non-stationary data. The time period factor, reflecting training and testing duration, influences prediction accuracy. Longer training periods capture long-term trends, crucial for gradual changes. ARIMA requires sufficient training for stationarity, while LSTM benefits from longer periods. Adapting models to changing patterns through periodic updates enhances accuracy. Finding the optimal time period balances historical information capture and model adaptability to change.

We use 6 months, 1 year, 3 years and 5 years four different time periods to test the relationship between length of time horizon and accuracy of prediction. It performs three trials for each period. The test results are as below (Table 3).

Table 2

**The difference between a classic ARMA model and an LSTM model**

| Model | Strengths                                                                                                                                                                    | Weaknesses                                                                                                                                                          |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ARMA  | ARMA models are effective for capturing linear dependencies in time series data and are relatively interpretable.                                                            | ARMA may struggle with non-linear relationships, complex patterns, and long-term dependencies.                                                                      |
| LSTM  | LSTMs excel at capturing non-linear dependencies, handling long sequences, and learning complex patterns. They are well-suited for time series data with intricate dynamics. | LSTMs can be computationally intensive, may require a larger amount of data to train effectively, and their black-box nature makes interpretation more challenging. |

Table 3

**The test the relationship between length of time horizon and accuracy**

| Stock index symbol      | Time period | Trial     | MAE     | Average MAE | RMSE    | Average RMSE |
|-------------------------|-------------|-----------|---------|-------------|---------|--------------|
| 1                       | 2           | 3         | 4       | 5           | 6       | 7            |
| NASDAQ INDEX ETF (QQQ)  | 6 months    | 1st trial | 6.7135  | 8.7709      | 1.7893  | 1.8691       |
|                         | 6 months    | 2nd trial | 9.6697  |             | 1.9716  |              |
|                         | 6 months    | 3rd trial | 9.9296  |             | 1.8464  |              |
|                         | 1 year      | 1st trial | 10.7406 | 14.7756     | 6.1734  | 6.3860       |
|                         |             | 2nd trial | 15.3006 |             | 5.0005  |              |
|                         |             | 3rd trial | 18.2858 |             | 7.9841  |              |
|                         | 3 years     | 1st trial | 24.3482 | 24.1006     | 7.9908  | 8.1220       |
|                         |             | 2nd trial | 24.3163 |             | 7.6801  |              |
|                         |             | 3rd trial | 23.6374 |             | 8.6952  |              |
|                         | 5 years     | 1st trial | 31.4609 | 31.5846     | 7.5907  | 9.0781       |
|                         |             | 2nd trial | 31.5941 |             | 10.5352 |              |
|                         |             | 3rd trial | 31.6988 |             | 9.1086  |              |
| S&P 500 INDEX ETF (SPY) | 6 months    | 1st trial | 5.8295  | 5.9424      | 1.0637  | 1.3618       |
|                         | 6 months    | 2nd trial | 6.1867  |             | 1.6571  |              |
|                         | 6 months    | 3rd trial | 5.8112  |             | 1.3648  |              |
|                         | 1 year      | 1st trial | 8.3912  | 8.4622      | 3.1726  | 2.6822       |
|                         |             | 2nd trial | 9.1074  |             | 3.2899  |              |
|                         |             | 3rd trial | 7.8880  |             | 1.5840  |              |
|                         | 3 years     | 1st trial | 11.7970 | 12.1536     | 3.7479  | 4.3685       |
|                         |             | 2nd trial | 11.5517 |             | 2.6988  |              |
|                         |             | 3rd trial | 13.1121 |             | 6.6587  |              |
|                         | 5 years     | 1st trial | 17.8998 | 18.7945     | 4.4478  | 8.3420       |
|                         |             | 2nd trial | 21.1163 |             | 15.1932 |              |
|                         |             | 3rd trial | 17.3673 |             | 5.3850  |              |

Table 3 (ending)

| 1                           | 2        | 3         | 4       | 5       | 6      | 7      |
|-----------------------------|----------|-----------|---------|---------|--------|--------|
| DOW JONES INDEX<br>ETF(DIA) | 6 months | 1st trial | 4.2899  | 4.4544  | 1.1860 | 1.2047 |
|                             | 6 months | 2nd trial | 5.0016  |         | 1.5155 |        |
|                             | 6 months | 3rd trial | 4.0717  |         | 0.9126 |        |
|                             | 1 year   | 1st trial | 9.3840  | 7.9804  | 1.7926 | 1.8547 |
|                             | 1 year   | 2nd trial | 7.8737  |         | 1.8309 |        |
|                             | 1 year   | 3rd trial | 6.6833  |         | 1.9406 |        |
|                             | 3 years  | 1st trial | 9.4862  | 9.5353  | 2.6493 | 2.5654 |
|                             | 3 years  | 2nd trial | 9.5737  |         | 2.4493 |        |
|                             | 3 years  | 3rd trial | 9.5460  |         | 2.5977 |        |
|                             | 5 years  | 1st trial | 15.4066 | 15.6000 | 2.8401 | 3.2497 |
|                             | 5 years  | 2nd trial | 15.2846 |         | 1.4647 |        |
|                             | 5 years  | 3rd trial | 16.1087 |         | 5.4442 |        |

Volatility measures the degree of price fluctuation in financial instruments over time and is crucial in assessing risk. In stock market prediction, volatility significantly impacts model performance. Traditional models like ARIMA may struggle with high volatility due to their stationary assumptions.

Advanced models like LSTM networks are more adaptable to volatility, capturing long-term patterns effectively. Models incorporating volatility indicators can better manage uncertainty. High volatility poses challenges for prediction accuracy, but adaptive models can offer robust forecasts.

In the research, we test volatility’s relationship with prediction accuracy over different time periods using MAE and RMSE evaluation metrics. LSTM models demonstrate high accuracy, especially in shorter time frames and high-volatility scenarios.

**Conclusions and future work.** Stock market data are affected by many external factors, such as national policy, macroeconomics, company fundamentals and human psychological factors. Therefore, stock price

patterns are difficult to predict, which in turn affects stock indexes. Traditional statistical analysis prediction models have certain deficiencies in predicting complex stock market time series data, while the deep learning model LSTM neural network has greater advantages in predicting long-term series data, and the model has stronger generalization capabilities.

By building a deep learning LSTM neural network model, the influence of certain human irrational factors can be eliminated, allowing the computer to continuously learn from historical data to derive corresponding data change patterns. The use of LSTM can improve the accuracy of forecasting operations in the stock market by up in average to 15 % compared to using the ARMA model according to the research. LSTM neural network demonstrates promising accuracy in predicting stock market operations, highlighting its potential for effective forecasting, while future research could explore its application across diverse market conditions and the integration of real-time data for enhanced performance.

**Bibliography:**

1. David M. Q. Nelson, Adriano C. M. Pereira, Renato A. de Oliveira. Stock Market’s Price Movement Prediction with LSTM Neural Networks. *International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*. 2017. P. 1419–1426. DOI: 10.1109/IJCNN.2017.7966019.
2. Adil Moghar, Mhamed Hamiche. Stock Market Prediction Using LSTM Recurrent Neural Network. *International Workshop on Statistical Methods and Artificial Intelligence (IWSMAI)*. 2020. Warsaw, Poland. Procedia Computer Science. Vol.170. P. 1168–1173. DOI: 10.1016/j.procs.2020.03.049.
3. Lin Y., Yan Y., Xu J., et al. Forecasting stock index price using the CEEMDAN-LSTM model. *The North American Journal of Economics and Finance*. 2021. Vol. 57. P. 101421.
4. Fischer T., Krauss C. Deep learning with long short-term memory networks for financial market predictions. *European Journal of Operational Research*. 2018. Vol. 270. P. 654–669.
5. Yang Q., Wang C. Research on global stock index prediction based on deep learning LSTM neural network. *Statistical Research*. 2019. Vol. 36 (03). P. 65–77.
6. Han Shanjie, Tan Shizhe. Design and implementation of deep learning model for stock prediction based on TensorFlow. *Computer Applications and Software*. 2018. Vol. 35 (6). P. 267–271.
7. Bao Zhenshan, Guo Junnan, Xie Yuan, Zhang Wenbo. Stock price fluctuation prediction model based on LSTM-GA. *Computer Science*. 2020. Vol. 47. P. 467–473.

8. G. Peter Zhang. Time series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network model. *Neurocomputing*. 2003. Vol. 50. P. 159–175.
9. Liu S., Zhang C., Ma J. CNN-LSTM neural network model for quantitative strategy analysis in stock markets. *International Conference on Neural Information Processing*. Springer, Cham. 2017. P. 198–206.
10. Ouyang Hong-Bing, Huang Kang, Yan Hong-Ju. Prediction of financial time series based on LSTM neural network. *Chinese Journal of Management Science*. 2020. Vol. 28 (4). P. 27–35.

### **Олещенко Л.М., Чжен Ц. ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ LSTM ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ОПЕРАЦІЙ НА ФОНДОВОМУ РИНКУ**

Фондовий ринок є важливою частиною сучасної фінансової системи. Аналіз і прогнозування тенденцій фондового ринку може ефективно допомогти інвесторам уникнути інвестиційних ризиків і збільшити прибуток. Фондовий індекс відображає зміни на фондовому ринку та може відображати тенденції ринку. Прогнозування часових рядів на фондовому ринку є актуальним напрямком досліджень серед інвесторів і науковців. Традиційні статистичні моделі широко використовуються в задачах прогнозування часових рядів даних фондового ринку. Через нелінійні характеристики даних часових рядів традиційні статистичні моделі мають певні недоліки та проблеми прогнозування. Моделі машинного навчання можуть ефективно вирішувати нелінійні проблеми в даних часових рядів. З розвитком моделей машинного навчання, моделі глибокого навчання, такі як штучні нейронні мережі, почали широко використовуватися в прогнозуванні часових рядів для даних фондового ринку.

У статті проаналізовано використання рекурентних нейронних мереж для прогнозування операцій на фондовому ринку. Наведено основні переваги та недоліки існуючих рішень. Описано запропоновану архітектуру програмного забезпечення та основні технології для прогнозування операцій на фондовому ринку, наведено опис розробленого програмного забезпечення, його основних модулів та компонентів. Наведено функціональні можливості розробленого програмного продукту. Проаналізовано ефективність запропонованого програмного методу з використанням нейронної мережі LSTM для прогнозування операцій на фондовому ринку.

Запропоноване програмне забезпечення реалізує метод навчання нейронної мережі LSTM для підвищення точності прогнозування фінансових операцій на фондовому ринку. Згідно досліджень, використання LSTM може підвищити точність прогнозування операцій на фондовому ринку в середньому до 15 % у порівнянні з використанням моделі ARMA. Розроблене програмне забезпечення на мові програмування Python разом із бібліотеками та модулями машинного навчання дозволяє отримувати відносно точні результати прогнозування, аніж з використанням відомих статистичних методів.

**Ключові слова:** програмне забезпечення, нейронні мережі, ARMA, ANN, RNN, LSTM, Python, TensorFlow, прогнозування операцій фондового ринку.

*Palonyi A.S.*

Flight Academy of the National Aviation University

## DEVELOPMENT OF REQUIREMENTS FOR A DECISION SUPPORT SYSTEM FOR A SHIFT SUPERVISOR TO MANAGE PROFESSIONAL STRESS OF AIR TRAFFIC CONTROLLERS

*The article is devoted to the current scientific and practical issue of managing air traffic controllers' (ATCO) occupational stress to enhance their professional reliability and flight safety. The main factors of occupational stress in air traffic control and stress management techniques are analyzed. Effective management of ATCO stress is the critical role of the ATC shift supervisors on duty. To solve these problems, they should be provided with decision support tools. It has been determined that there are currently no effective automated tools for real-time monitoring and controlling ATCO occupational stress. The idea of developing a decision support system (DSS) for ATCO shift supervisors, that will provide alerts, information, and recommendations for job-related stress management, is proposed. A functional model of stress management, as a "white box model", provides a comprehensive approach to stress analysis and management at ATCO workplace. The model's data types, constraints, priorities, input and output parameters are defined. The proposed model takes into account feedback loops that allow for the dynamic adaptation of management decisions and individual strategies in accordance with the effectiveness of their application. Global, local and individual priorities in managing ATCO occupational stress are considered. The identified patterns in strategic and tactical management of ATCO occupational stress should contribute to the revision of the enterprise's current stress management methodology, local and individual policies, and priorities. DSS can help ATC shift supervisors make timely and more informed decisions by providing them with data and analysis on different types of stress factors, stress levels, key performance indicators and level of fatigue; producing recommendations and monitoring, organizational, technological and individual coping strategies for managing ATCO stress. This article describes main functional requirements for the DSS, namely, reliability, functionality, adaptability, performance, the user interface and system maintenance requirements.*

**Key words:** *air traffic controller (ATCO), occupational stress, stress management, automated tools, functional model, functional requirements.*

**Formulation of the problem.** Flight safety is a key objective of civil aviation. Statistical data show that the human factor, in particular the mistakes of aviation professionals, is the cause of the vast majority of aviation accidents and their precursors – serious incidents [1–3]. The contribution of the human factor in aviation accidents don't decrease and amounts to 70 % to 80 % on international air routes, while only 15 % to 20 % are due to design and manufacturing defects of aircraft [4]. The impact of the human factor on the activities of air traffic controllers (ATCO) is especially dangerous.

ATCOs work in a high level of responsibility and complexity of air traffic situations, intensity of mental activity under conditions when the two aspects uncertainty and time pressure come together. The ATCO's stress level is affected by limitations and possible equipment failure, peak load hours, emergency situations and unforeseen circumstances. The decisions of ATCOs are often influenced by the perception of risk to human lives, which creates

additional stress for their daily work [5]. In addition, ATCOs must adapt to shift work and constant changes in ATCO shifts throughout the week on weekends and at night, resolve conflict situations in teamwork, and maintain focus in the workplace. The isolated, semi-dark workspace creates more physical and mental strain on ATCO and negatively affects their professional abilities, response time, and attention distribution [6]. Working under such conditions leads to the development of chronic occupational stress. According to some studies, the profession of an ATCO is among the top five most stressful professions [7]. Chronic stress can significantly worsen the psycho-emotional state and cognitive functions of ATCOs. It leads to an increase in the number of errors, a decrease in work efficiency, and an increase in risks to flight safety. The highly stressful nature of work in ATC positions together with high requirements for the level of professional training, directly limits the supply of labor. The aviation industry is already facing a shortage of personnel and airspace

congestion [8, 9]. The potential consequences of occupational stress are disorders in the functioning of the nervous, cardiovascular, and digestive systems, as well as psychoneurotic disorders. All this negatively affects the health, well-being and ATCO performance. Therefore, unregulated intense, long-term, and often repetitive occupational stress can eventually lead to burnout, health deterioration, and shortening of an ATCO career, and reduce their life expectancy.

Despite the urgency of the problem, currently, there are no effective automated tools for monitoring and controlling the occupational stress of ATCO in real-time. Existing methods are mainly based on the subjective assessment of the ATCO state. The lack of objective control over the dynamics of stress in the workplace can lead to errors and aviation incidents. The responsibility for managing the stress of specialists in the ATCO shift should be borne by their managers – supervisors. Thus, Havermans B. et al., based on the results of interviews with employees and supervisors from various industries, identified the need for: 1) communication about occupational stress; 2) paying attention to the determinants of occupational stress (job demands, support from colleagues and supervisors, autonomy/control); 3) providing the favorable circumstances for stress prevention, including a supportive organizational culture; 4) the availability of stress prevention measures in the workplace and so on. Both employees and supervisors believe that the supervisors should communicate about work stress. Employees were reluctant to initiate such communication fearing the consequences, which indicates the importance of creating an atmosphere of psychological safety in the organization [10]. However, currently, supervisors, particularly in the ATC system, do not have special tools of information support for managerial decision-making on this issue. Thus, the development of a decision support system (DSS) for ATCO shifts supervisors, which will provide recommendations for managing stress in the ATCO workplaces, is an important scientific and practical task. Such a system will improve the effectiveness of stress management, psychological stability, and reliability of operators. And this, in turn, will contribute to improving the level of flight safety.

**Analysis of recent research and publications.** Occupational stress and stressors are the subject of active multidisciplinary research at the intersection of psychology, ergonomics, and management. Researchers use various approaches to conceptualizing and measuring stress, including analyzing physiological indicators, surveying and interviewing

staff, observing workplaces and so on. For instance, in their research on gender differences in physiological stress responses to a computer breakdown during a time-limited task, Riedl et al. used skin conductance as a reliable indicator of sympathetic nervous system activity [11]. The Management Standards Indicator Tool (MSIT) questionnaire, considered by researcher Houdmont J. et al., allows for assessing psychosocial risks in workplaces within organizations [12]. A multimodal approach is the most often used to assess stress and workload in pilots. It combines objective measurements (physiological indicators, including cardiac and brain activity, respiration, electrodermal activity, skin temperature, eye movements, muscle strength, voice), subjective methods (questionnaires) and assessment of task performance quality. However, recording certain parameters is problematic in real flight conditions [13].

To prevent ATCO occupational stress, relevant measures should be taken at various levels: socio-economic (improvement of legislation, current regulations and methods of social support); technological and organizational (ensuring an appropriate level of automation in the workplace, improving working conditions and work schedules); ergonomic (optimizing workplace design and work environment according to ergonomic criteria); individual (training in coping strategies, psychological support). According to Giovanni C., important preventive measures include rationalizing ATCO shift schedules based on psychophysiological and social criteria, providing breaks during work and involving ATCO in decision-making processes. Additionally, they need special psychological support in cases of severe emotional stress after aviation incidents to prevent post-traumatic stress disorders. Medical surveillance and screening should be aimed not only at assessment of professional suitability but also at healthcare, early detection and correction of stress-related disorders [14].

The specifics of stress management in the field of ATC are covered in a number of sectoral documents. The International Federation of Air Traffic Controllers' Associations (IFATCA) classifies occupational stressors of ATCO and provides recommendations on policies and procedures for their elimination. Eurocontrol defines three levels of stress management: primary (prevention), secondary (raising staff awareness and preparedness) and tertiary (minimizing consequences and rehabilitation) [15]. In some countries, Critical Incident Stress Management (CISM) programs, based on the Mitchell method, have already been implemented. They

including measures of psychological support and debriefing.

There are a number of studies dedicated to the development of information systems for automated stress monitoring and management. For example, Sazvar Z. et al. presented a comprehensive DSS for assessing stress levels and generating possible solutions to reduce it in project-oriented organizations using expert assessment methods and fuzzy logic [16]. Rodrigues S. et al. proposed monitoring tools for quantitative assessment of occupational health and tracking stress levels in firefighters in real-time. They provide assistance for human resource management and development of anti-stress measures in timely manner [17]. Winslow B. D. demonstrated the feasibility of combining mobile applications for tracking physiological stress, using a commercial wearable device, and cognitive-behavioral therapy to reduce stress in military personnel and other vulnerable populations [18]. The application notifies users about the presence of stress, guides them through stress reduction methods, and transmits information to physicians. This approach leads to increased adherence to therapy and more effective symptom reduction. Masi G et al. note that real-time monitoring of pilots' psychophysiological state is of great importance for improving flight safety, enhancing working conditions, and optimizing pilot interaction with onboard equipment. However, the implementation of new monitoring tools is complicated by strict regulatory standards. Aviation simulators studies provide more opportunities to control experimental conditions and apply various real-time monitoring tools. However, the obtained patterns are not always reproduced in real flights [13].

**Task statement.** The purpose of article is formulation of requirements for the DSS that supports ATCO shifts supervisor to manage job-related stress among ATCOs.

**Outline of the main material of the study.** To effectively manage occupational stress among ATCOs, the DSS must be able to perform the following functions:

1. To conduct a comprehensive analysis of the psycho-emotional state of ATCOs using their biometric indicators.

2. To determine the level of ATCO's cognitive workload, taking into account the current airspace congestion, operational constraints, workplace-specific requirements, the effectiveness of team interaction, as well as various events, communicative, psycho-emotional, organizational, and frustration factors.

3. To inform ATCOs and their supervisors about sources of stress and expected dangerous stressors, risks of reaching critical stress thresholds

and the predicted overall level of workplace stress by considering individual characteristics of each ATCO.

4. To facilitate the prediction of potential stressful situations, enabling adaptive and proactive intervention to prevent reaching dangerous ATCO stress thresholds. This will be accomplished by providing recommendations to ATCO shift supervisors on the proactive stress management, offering them strategic (long-term organizational actions based on identified trends) and tactical personalized stress management methods for the ATCO workplace. Fig. 1 presents a functional model for the stress management in the ATCO workplace as a "white box model". The model provides a systematic, transparent, and flexible approach to the analysis and management of occupational stress to make informed decisions by the ATCO shift supervisor.

The process of ATCO occupational stress management (S) can be mathematically represented as a set of:

$$S = \langle F, D, P, Y, \alpha, \gamma, \Omega_1, \Omega_2 \rangle \quad (1)$$

where:  $F = \langle f_1, f_2, \dots, f_n \rangle$  – the set of input data;

$D = \langle d_1, d_2, \dots, d_m \rangle$  – the set of applicable restrictions and regulatory requirements;

$P = \langle p_1, p_2, \dots, p_s \rangle$  – the set of priorities in stress management;

$Y = \langle y_1, y_2, \dots, y_k \rangle$  – the set of output data;

$\alpha$  – job-related stress management function;

$\gamma$  – the feedback function, that updates data on the effectiveness of measures applied to regulate the level of occupational stress;

$\Omega_1$  – the function to adjust the stress management methodology;

$\Omega_2$  – the function of revising local and individual priorities for ATCO's stress.

In this model, the elements of the set "F" are:

$f_1$  – data on detected stressors;

$f_2$  – personal data on ATCOs;

$f_3$  – organizational data on team resource management, structural changes, etc.;

$f_4$  – data on the effectiveness of ATCOs' occupational stress management strategies.

The set "D" is formed by the following elements:

$d_1$  – data on best practices and stress management techniques in civil aviation (e.g. CISM) that are being applied;

$d_2$  – the set of laws, regulations, guidelines and specifications relevant to the setting working hours of the ATCO staff, providing scheduled breaks and rest, airspace sectorization, automation needs;

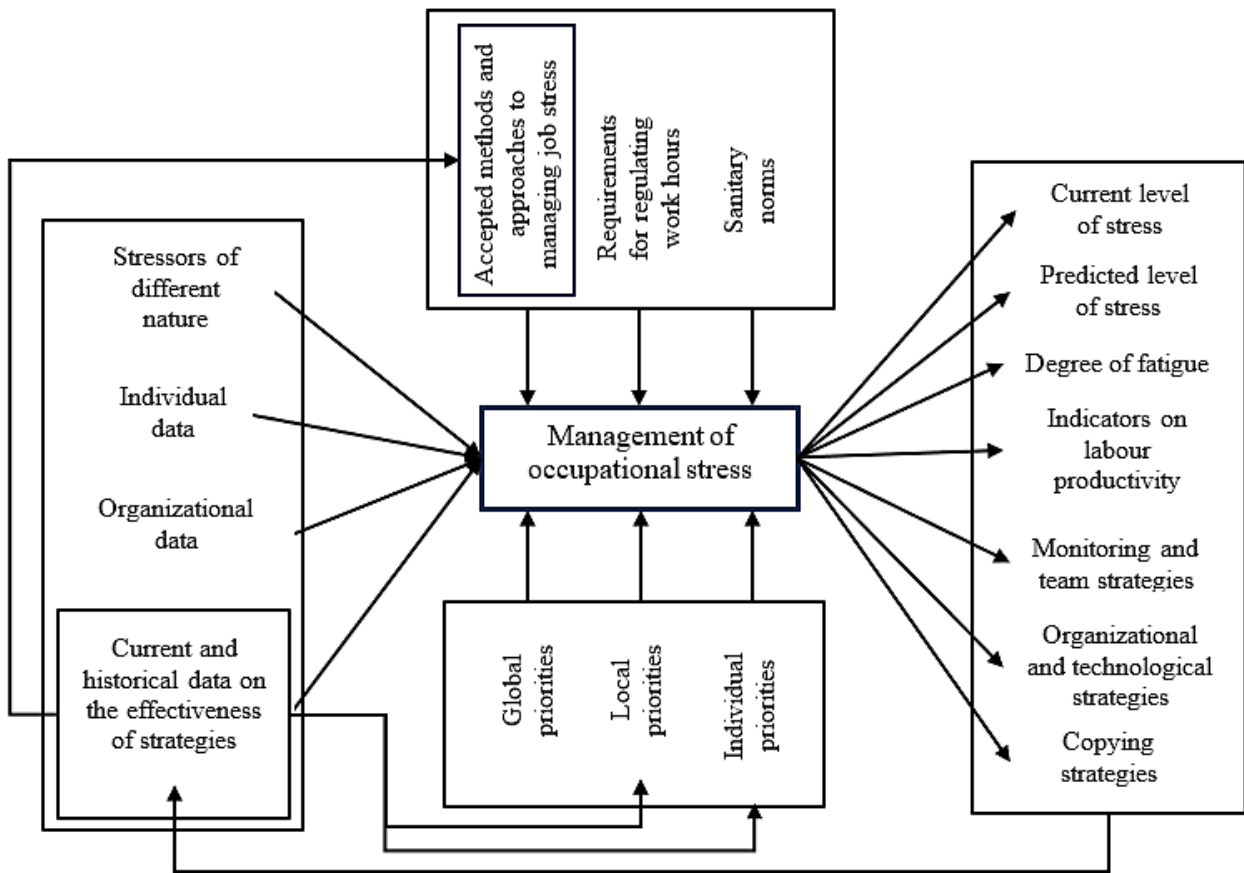


Fig. 1. Functional model of ATCO stress management: the “white box model”

$d_3$  – sanitary norms on microclimate (illumination, temperature, humidity, noise etc.) at ATCOs’ workplaces.

The set “P” consists of the following elements:

$p_1$  – data on the general (global) priorities for managing ATCOs’ stress during work hours;

$p_2$  – data on local priorities for managing ATCOs’ occupational stress;

$p_3$  – data on individual priorities for managing ATCOs’ job-related stress.

The set of output data “Y” includes:

$y_1$  – the measured level of occupational stress;

$y_2$  – calculated changes in the level of occupational stress;

$y_3$  – the degree of fatigue;

$y_4$  – measured values of labor productivity parameters;

$y_5$  – stress management strategies of different levels of application.

The feedback loops in the considered model are a key element of effective stress management, as they allow dynamically adapting managerial decisions and individual strategies in accordance with application efficiency. Moreover, the identified trends in the effectiveness of strategic and tactical ATCO stress

management should contribute to the revision of the stress management methodology, the global, local and individual priorities in order to create a unique approach, taking into account cultural and local specificities, or prompt a paradigm shift.

The central block “ATCO Stress Management” of the model represents the processes of applying regulatory documents, methods, and recommendations for stress management in ATCO workplaces, empirical knowledge about the phases of potential productivity and functional state of ATCO (“warm-up” or “rising productivity”, “stable high productivity”, “rising fatigue” and “breakdown”), knowledge about the patterns of influence of the occupational stress levels on the ATCO performance in order to minimize the negative impact of stressors on the functional and emotional state of ATCO, to prevent burnout and ensure conditions for extending their professional life. Stress management of ATCOs must be carried out in accordance with regulatory certification requirements and standards in air traffic management. This includes compliance with working hours and rest norms, ensuring proper working conditions and undergoing regular medical examinations.

**Stress factors** include various conditions and events that affect the level of ATCO job-related stress, such as workload, “no room for error”, fatigue, depression, lack of time for decision-making, conditions at ATCO workplaces, interpersonal relationships within the ATCO shift team, organizational factors, dangerous weather hazards, technical failures of onboard and ground equipment, planned and active restricted airspace, serious incidents etc. **Individual and organizational data** includes: data from surveys and psychological testing of ATCOs; data on recent experience related to serious incidents and accidents; self-assessment data on stress levels and emotional state; data on experience, age, and qualification levels of ATCOs; data on periodic professional (simulator) training; data on long-term work breaks (illness, maternity leave); data on the quantitative and qualitative composition of ATCOs, airspace sectorization, applied ATCO shift schedules and staff distribution; data on the number and duration of breaks within ATCO shifts; information on organizational changes in air traffic service units, changes in ATCO procedures etc. **Subjective data** that may relate to current and historical data on the effectiveness of applying stress management strategies include survey results from ATCOs regarding the perceived effectiveness of stress management strategies (in particular, data on changes in feelings of self-efficacy and job satisfaction before and after implementing the strategies), feedback and suggestions from ATCOs on improving stress management strategies, self-assessment data on stress levels and dynamics of changes resulting from the strategy implementation. **Objective indicators and sources of information include** individual differences in behavioral and psychophysiological indices and individual work performance. The data sets are the basis for applying an adaptive approach to stress management of ATCOs.

The integration and analysis of the above heterogeneous data within a functional stress management model allows for a comprehensive understanding of stress factors, generates organizational, technological and team strategies for ATCO shift supervisor, provides coping strategies tailored to the management of stress and fatigue for ATCOs, evaluates applied techniques. It is important to ensure the reliability, safety and confidentiality of these information flows, as well as to provide mechanisms for filtering and pre-processing data for their effective use in DSS.

In the context of ATCO stress management, **the global priorities** in the model are: 1) ensuring flight

safety; 2) maintaining and improving the psychological health of ATCOs; 3) fostering an atmosphere of team support and cooperation; 4) continuously improving approaches and strategies for ATCO stress management; 5) providing ATCOs with opportunities for training and professional development in the context of forming and improving special competence in stress management at the individual and team levels (for example, implementation of a Team Resource Management program). **Local priorities** in ATCO stress management may vary depending on the specifics of a particular structural regional division of enterprise, its service area and other factors. **Individually-oriented priorities** relate to a specific workplace within the particular ATCO units, used to optimizing workload taking into account the individual characteristics, training level, and experience of air traffic ATCOs.

Based on the set of priorities considered, existing stressors, organizational conditions, operational requirements, and applied approaches to ATCO stress management, the optimal set of strategies and techniques for managing ATCO job-related stress is determined. For example, **monitoring and team strategies** may involve the use of additional psychological tests to assess the emotional state, level of anxiety, depression, burnout of ATCOs; conducting surveys on job satisfaction, team support, and other factors affecting stress; using voice analysis methods and behavioral markers to detect signs of stress and emotional exhaustion during communication with pilots and other controllers; conducting debriefings with ATCOs to discuss stress-related issues (serious incidents) and collect their feedback and suggestions etc. **Organizational and technological strategies** may include measures to improve workplace ergonomics and ensure optimal lighting, temperature, and noise levels in the work premises; implementation of convenient and intuitive ATCO interfaces to minimize the ATCO’s cognitive load etc. Individual coping strategies include personalized cognitive restructuring strategies, individual emotional regulation strategies, a personal support network from colleagues, personalized professional development programs and relaxation techniques etc.

To develop an automated occupational stress management system in air traffic control, should be taken into account important basic system of requirements are shown in Fig. 2.

Let’s take a closer look at these requirements. **Functional requirements** provide the following capabilities: inputting and editing a list of typical stressors with conditions for their identification



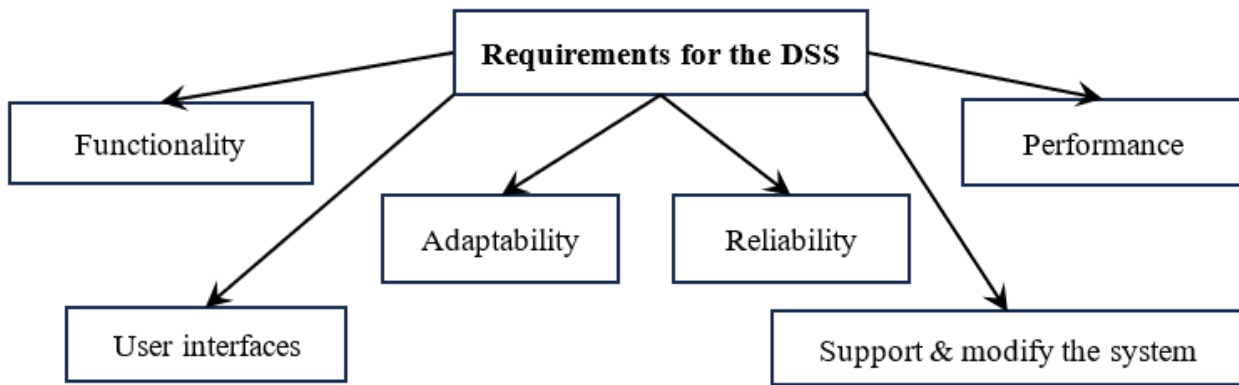


Fig. 2. Basic requirements for stress management in air traffic control

and configuring importance weights; assessing the current level of each stressor on a certain scale (e.g. from 0 to 10); calculating an integral empirical indicator of occupational stress based on the values of stressors and their weights; forming a base of fuzzy inference rules of the “IF-THEN” type to determine the level of stress and displaying the result of stress level assessment in the form of a linguistic variable (“low”, “medium”, “high”, “critical”); selecting the most effective measures taking into account the current constraints (time, financial, organizational etc.); generating notifications and informational messages with explanations regarding the assessment of the current stress level and recommended measures (with the ability to configure the degree of detail of informational and recommendation messages); forming a knowledge base on the effectiveness of various measures applied for managing job-related stress levels.

**The requirements for adaptability** include: consideration of individual preferences by the system, stress resilience levels of each ATCO, and their psychological profiles to provide recommendations for stress management; detecting trends, predicting stress levels and stress reactions based on historical data for each ATCO; taking into account the time of day, phases of potential productivity and operational environment requirements to form a set of measures to prevent high stress levels in ATC.

**User interface requirements** provide the following capabilities: flexible configuration of the stressors list, rules, and measures without the need for changes to the program code; use of a convenient and intuitive graphical interface by end users; visualization of results in the form of graphs, diagrams, tables with the ability to print and export; receiving contextual prompts and help information to facilitate user work; differentiation of access rights for different categories of users (administrator, expert, supervisor, ATCO).

**Reliability requirements** provide the following capabilities: ensuring the integrity and consistency of the knowledge base; checking the correctness of the entered data and protection against user errors; automatic saving of intermediate work results with the possibility of recovery in case of failures; maintaining detailed system logs for tracking and diagnosing potential problems.

**Performance requirements** provide the following capabilities: obtaining stress level assessment results and recommendations in real-time; optimization of fuzzy logic inference and decision selection algorithms to reduce computation time; working with large data volumes without significant loss of performance.

**Maintenance and modification requirements** provide the following capabilities: adding, removing, or modifying individual components of the DSS without affecting others due to its modular architecture; maintaining detailed software and user documentation; integration with other enterprise DSS information systems for data import/export; updating the knowledge base based on machine learning or expert assessments.

**Conclusions.** The application of the considered approach to building a DSS for job-related stress management will increase professional reliability of ATCOs by providing their supervisors with automated tools for supporting operational organizational decision-making in stress management. The proposed functional model will ensure a comprehensive approach to stress management among ATCOs by integrating the collection and analysis of various data, forecasting stress levels, providing timely alerts and recommendations, as well as continuous improvement of the implemented system based on feedback and accumulated experience.

The future directions of research include: 1) identification of different stressors and stress levels among ATCOs, ranking them; 2) investigation

of the relationships between different clusters of stress factors and their synergistic impact on the psychophysiological state of ATCOs; 3) determination and validation of threshold values for the level of occupational stress; 4) mathematical modelling to make predictions the level of job-related stress of ATCOs based on the analysis of the effects of various stress factors; 5) development of personalized methods and strategies for managing

the stress of ATCOs, taking into account their individual characteristics and needs; 6) research on the effectiveness of strategic and tactical stress management measures recommended by the DSS, and their impact on the professional reliability of ATCOs; 7) development of interfaces and protocols for interaction of the DSS with available air traffic management and ATC systems in order to obtain data for determining stress factors.

#### Bibliography:

1. Human Factors Guidelines for Safety Audits Manual (Doc 9806-AN/763). Montreal: ICAO, 2002. 138 p.
2. Shappell S., Detwiler C., Holcomb K., Hackworth C., Boquet A., Wiegmann D. A. Human error and commercial aviation accidents: an analysis using the human factors analysis and classification system. *Human Factors*. 2007. Vol. 49, No. 2. P. 227–242. URL: <https://doi.org/10.1518/001872007X312469> (date of access: 20.05.2024).
3. Mathavara K., Ramachandran G. Role of Human Factors in Preventing Aviation Accidents: An Insight. 2022. 26 p. URL: <https://doi.org/10.5772/intechopen.106899> (date of access: 20.05.2024).
4. Pons D., Dey K. Aviation Human Error Modelled as a Production Process. *The Ergonomics Open Journal*. 2015. Vol. 8. P. 1–12. URL: <https://doi.org/10.2174/1875934301508010001> (date of access: 20.05.2024).
5. Loft S., Sanderson P., Neal A., Mooij M. (). Modeling and predicting mental workload in en route air traffic control: Critical review and broader implications. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*. 2007. Vol. 49. № 3. P. 376–399. URL: <https://doi.org/10.1518/001872007X197017> (date of access: 20.05.2024).
6. Jou R., Kuo C., Tang M. A study of job stress and turnover tendency among air traffic controllers: The mediating effect of job satisfaction. *Transportation Research*. 2013. Vol. 57. P. 95–104. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.01.009> (date of access: 20.05.2024).
7. Top 5 most stressful jobs: : web-site. URL: <https://www.csmonitor.com/USA/2010/0811/Top-5-most-stressful-jobs/Air-traffic-controller> (date of access: 20.05.2024).
8. EUROCONTROL Human Resources Team. Guidelines for selection procedures and tests for ab initio trainee controllers (Revised), HRS/MSP-002-GUI-01. Brussels, Belgium: EUROCONTROL, 2001. 100 p.
9. Xiaotian E., Zhang J. Holistic thinking and air traffic controllers' decision making in conflict resolution. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2017. Vol. 45. P. 110–121. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trf.2016.11.007> (date of access: 20.05.2024).
10. Havermans Bo., Brouwers E., Hoek R., Anema J., van der Beek A., Boot C. Work stress prevention needs of employees and supervisors. *BMC Public Health*. 2018. Vol. 18. URL: <https://doi.org/10.1186/s12889-018-5535-1> (date of access: 20.05.2024).
11. Riedl R., Kindermann H., Auinger A., Javor A. Computer Breakdown as a Stress Factor during Task Completion under Time Pressure: Identifying Gender Differences Based on Skin Conductance. *Advances in Human-Computer Interaction*. 2013. URL: <https://doi.org/10.1155/2013/420169> (date of access: 21.05.2024).
12. Houdmont J., Randall R., Kerr R., Addley K. Psychosocial risk assessment in organizations: Concurrent validity of the brief version of the Management Standards Indicator Tool. *Work and Stress*. 2013. Vol. 23. URL: <https://doi.org/10.1080/02678373.2013.843607> (date of access: 21.05.2024).
13. Masi G., Amprimo G., Ferraris C., Priano L. Stress and Workload Assessment in Aviation – A Narrative Review. *Review. Sensors (Basel)*. 2023. Vol. 23, No. 7. URL: <https://doi.org/10.3390/s23073556> (date of access: 21.05.2024).
14. Giovanni C. Occupational stress and stress prevention in air traffic control: working papers. *International labor office Geneva*. 2009. 43 p.
15. Critical Incident Stress Management in Air Traffic Control (2004-028EEC Note 2004/15). EUROCONTROL Experimental Centre, 1 January 2014. 153 p.
16. Sazvar Z., Nayeri S., Mirbagheri R., Tanhaeean M., Fallahpour A., Wong K. Y. A hybrid decision-making framework to manage occupational stress in project-based organizations. *Soft Computing*, 2022. P. 1–16.
17. Rodrigues S., Paiva J. S., Dias D., Cunha J. P. S. Stress among on-duty firefighters: an ambulatory assessment study. *PeerJ*. 2018. URL: <https://doi.org/10.7717/peerj.5967> (date of access: 21.05.2024).
18. Winslow B. D., Kwasinski R., Hullfish J., Ruble M., Lynch A., Rogers T., Nofziger D., Brim W., Woodworth C. Automated stress detection using mobile application and wearable sensors improves symptoms of mental health disorders in military personnel. *Front. Digit. Health*. 2022, Vol. 4. URL: <https://doi.org/10.3389/fdgh.2022.919626> (date of access: 21.05.2024).

**Пальоний А.С. РОЗРОБКА ВИМОГ ДО СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ  
З УПРАВЛІННЯ ПРОФЕСІЙНИМ СТРЕСОМ АВІАДИСПЕТЧЕРІВ ДЛЯ СУПЕРВАЙЗЕРА  
ДИСПЕТЧЕРСЬКОЇ ЗМІНИ**

*Стаття присвячена актуальній науково-практичній проблемі управління професійним стресом диспетчерів управління повітряним рухом (УПР) для підвищення їх професійної надійності та безпеки польотів. Проаналізовано основні фактори професійного стресу при УПР і техніки управління стресом. Ефективне управління стресом серед диспетчерів УПР є критично важливою функцією супервайзерів диспетчерських змін. Для успішного вирішення завдань, пов'язаних з цією функцією, вони повинні бути забезпечені засобами підтримки прийняття рішень. Визначено, що наразі відсутні ефективні автоматизовані інструменти для менеджменту професійного стресу диспетчерів УПР в режимі реального часу. В статті запропонована ідея розробки системи підтримки прийняття рішень (СППР) для супервайзерів диспетчерських змін, що надаватиме їм сповіщення, інформацію та рекомендації з управління професійним стресом авіадиспетчерів. Представлено функціональну модель менеджменту професійного стресу авіадиспетчерів у вигляді «моделі білої скриньки», що забезпечує комплексний підхід до аналізу та управління стресом на робочих місцях диспетчерів УПР. Визначені типи даних моделі, обмеження, пріоритети, вхідні та вихідні параметри. Запропонована модель враховує зворотні зв'язки, що забезпечують динамічну адаптацію управлінських рішень та індивідуальних стратегій керування стресом відповідно до ефективності їх застосування. Розглянуто глобальні, локальні та індивідуальні пріоритети в управлінні професійним стресом авіадиспетчерів. Визначені закономірності у стратегічному й тактичному керуванні професійним стресом авіадиспетчерів мають сприяти ревізії діючої на підприємстві методики управління стресом, локальних та індивідуальних політик і пріоритетів. СППР може допомогти супервайзерам диспетчерських змін приймати своєчасні та більш обґрунтовані рішення на підставі результатів оцінки різних видів факторів стресу, рівнів стресу, ключових показників ефективності та рівня втоми; формувати рекомендації та відстежувати організаційні, технологічні та індивідуальні стратегії подолання професійного стресу диспетчерів УПР. У статті розкрито основні функціональні вимоги до СППР, а саме: надійність, функціональність, адаптивність, продуктивність, вимоги до інтерфейсу користувача та супроводу системи.*

**Ключові слова:** диспетчер управління повітряним рухом (УПР), професійний стрес, управління стресом, автоматизовані інструменти, функціональна модель, функціональні вимоги.

**Півторак Д.О.**

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

**Цибульник С.О.**

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

**Павловський О.М.**

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

## ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ІНФОРМАЦІЙНОГО СИГНАЛУ В ОПІР ДЛЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ

*Для імітації потенціометричного датчика системи автоматичного керування технологічними процесами запропоновано використовувати модифікований оптико-електронний перетворювач напруги в опір, який має гальванічну розв'язку виходу і має лінійну характеристику в заданому діапазоні зміни вихідного опору. Принцип дії перетворювача заснований на зміні опору фоторезисторів під впливом оптичного випромінювання, що йде від керованого джерела. В оптичному блоці перетворювача встановлено джерело оптичного випромінювання і два одночасно спрямованих на нього фоторезистори. Сигнал з одного фоторезистора є вихідним, а сигнал із другого фоторезистора аналізується схемою керування, яка через регулятор яскравості синхронно змінює освітленість на світлочутливих майданчиках фоторезисторів залежно від рівня керуючої напруги і коригувальної поправки. Використання фоторезисторів з характеристиками, які відрізняються, а також за відмінностей у їхньому встановленні відносно джерела оптичного випромінювання, призводить до порушення лінійності функції відгуку перетворювача й істотного зниження точності його роботи. У статті отримано залежності, що описують взаємозв'язок параметрів фоторезисторів, які мають розкид характеристик і відмінності в їхньому встановленні відносно джерела оптичного випромінювання, що підтверджено експериментально. В роботі показано, що модифікація відомого оптико-електронного перетворювача шляхом введення коригувальної поправки на схемотехнічному рівні, дає змогу підвищити точність перетворення. Отримано вираз для функції відгуку модифікованого перетворювача напруга-опір. Похибка перетворення в результаті введення коригувальної поправки за результатами експериментальних досліджень не перевищує 1,6 %. Показано, що похибка перетворення в цьому випадку визначається, насамперед, точністю введення коригувальної поправки.*

**Ключові слова:** перетворювач, опір, сигнал, фоторезистор.

**Постановка проблеми.** Принцип дії систем автоматичного керування технологічними процесами ґрунтується на вимірюванні значень поточних параметрів і характеристик, обробці та збереженні отриманої інформації згідно із закладеною програмою з подальшою видачею керівних сигналів на виконавчі механізми для підтримання заданих параметрів. Вимірювання параметрів здійснюється за допомогою датчиків, які перетворюють величину впливу на вигляд, зручний для подальшого опрацювання в системі автоматичного керування [1, с. 15]. Одним із різновидів датчиків, що широко використовуються, є потенціометричні, що перетворюють величину вимірюваного параметра (наприклад, температуру) на величину опору [2, с. 12].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** З метою періодичного контролю працездатності

системи автоматичного керування технологічним процесом замість датчиків підключаються їхні імітатори, що подають у систему необхідні для контролю сигнали. Як імітатори потенціометричних датчиків широко використовують контактні або цифрові потенціометри, що мають низку недоліків, зазначених у роботах [3, с. 10; 4, с. 58; 4, с. 104]. У цих же роботах як імітатор потенціометричного датчика запропоновано використовувати оптико-електронний перетворювач напруга-опір, що має лінійну функцію відгуку і має фоторезисторний вихід, який забезпечує хорошу гальванічну розв'язку.

Основою перетворювача є джерело оптичного випромінювання з дистанційно регульованими параметрами та двома фоторезисторами, один з яких використовується для керування яскравістю джерела оптичного випромінювання, а сиг-

нал з другого зчитується системою автоматичного керування під час її налаштування або контролю працездатності.

Структурну схему оптико-електронного перетворювача інформаційного сигналу в опір показано на рис. 1.

Вихідним сигналом оптико-електронного перетворювача є опір  $R_{OUT}$ , величина якого лінійно залежить від значення вхідного інформаційного сигналу – величини напруги на його вході  $U_{IN}$ . У перетворювачі використано два фоторезистори, вихідний фоторезистор 1 і фоторезистор зворотного зв'язку 2, встановлені на однаковій відстані від джерела оптичного випромінювання, що дає змогу створити на світлочутливих майданчиках фоторезисторів однакову освітленість. Робота перетворювача ґрунтується на синхронній зміні опорів фоторезисторів, один з яких використовується для керування яскравістю джерела оптичного випромінювання [5, с. 105].

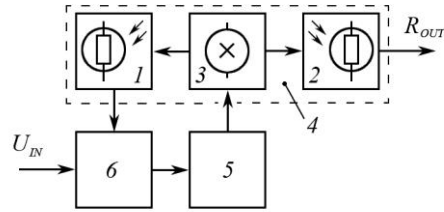
У роботі [4, с. 60] описано результати експериментальних досліджень макета даного перетворювача напруга в опір, отримано сімейства залежностей (функції відгуку перетворювача) для різних температур навколишнього середовища. Показано, що функція відгуку перетворювача в заданих межах зміни вихідного параметра є лінійною.

У роботах наголошується, що для його точної роботи, у перетворювачі мають бути використані однотипні фоторезистори, що мають однакові характеристики, встановлені на однаковій відстані та під прямим кутом до джерела оптичного випромінювання. Водночас, питання впливу розкиду параметрів фоторезисторів та коректності їхнього встановлення відносно джерела оптичного випромінювання на точність роботи оптико-електронного перетворювача інформаційного сигналу у вигляді напруги в опір, не розглянуто.

**Постановка завдання.** Метою статті є опис результатів досліджень впливу параметрів фоторезисторів і коректності їхнього встановлення відносно джерела оптичного випромінювання на точність роботи перетворювача.

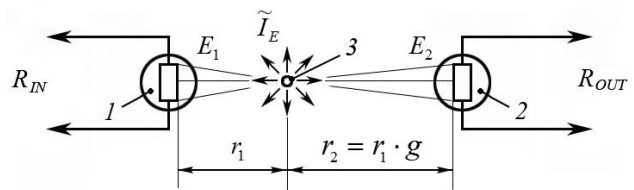
**Виклад основного матеріалу.** Основою побудови перетворювача інформаційного сигналу (величини напруги  $U_{IN}$ ) в опір  $R_{OUT}$  є кероване джерело випромінювання 3 і два спрямовані на нього фоторезистори – вихідний фоторезистор 2 і фоторезистор зворотного зв'язку 1 (рис. 2).

Джерело оптичного випромінювання 3 (розглядається як точкове джерело) має регульовану силу



**Рис. 1. Структурна схема перетворювача інформаційного сигналу у вигляді напруги в опір:**

- 1 – фоторезистор зворотного зв'язку;
- 2 – вихідний фоторезистор, 3 – джерело оптичного випромінювання, 4 – оптико-електронний блок;
- 5 – регулятор яскравості; 6 – схема керування



**Рис. 2. Розміщення фоторезисторів відносно джерела оптичного випромінювання:**

- 1 – фоторезистор зворотного зв'язку,
- 2 – вихідний фоторезистор, 3 – джерело оптичного випромінювання

світла  $\tilde{I}_E$ . На нього спрямовані фоторезистори 1 і 2, розташовані, відповідно, на відстані  $r_1$  і  $r_2$  від джерела випромінювання 3, світлочутливі майданчики яких розташовані під деякими кутами  $\phi_1$  і  $\phi_2$  по відношенню до джерела випромінювання. Джерело випромінювання 3 створює на світлочутливих майданчиках фоторезисторів 1 і 2 освітленість, яка визначається залежностями [6, с. 31]:

$$E_1 = \frac{\tilde{I}_E}{r_1^2} \cdot \cos \phi_1;$$

$$E_2 = \frac{\tilde{I}_E}{r_2^2} \cdot \cos \phi_2 = \frac{\tilde{I}_E}{(g \cdot r_1)^2} \cdot \cos \phi_2,$$

де  $g = \frac{r_2}{r_1}$ .

Тобто, освітленості світлочутливих майданчиків фоторезисторів 1 і 2 пов'язані між собою залежністю:

$$E_2 = \frac{E_1}{g^2} \cdot \frac{\cos \phi_2}{\cos \phi_1}. \quad (1)$$

При однаковому встановленні фоторезисторів відносно джерела оптичного випромінювання ( $\phi_1 = \phi_2, r_1 = r_2$ ), величина освітленості їхніх світлочутливих майданчиків буде однаковою.

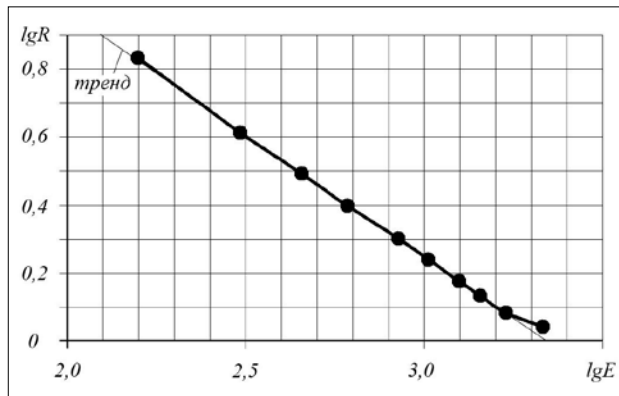


Рис. 3. Функція відгуку використовуваного в макеті фоторезистора GL5537, лінія тренда  
 $\lg R = 2,3958 - 0,716 \cdot \lg E$

В оптичному блоці макета застосовано фоторезистори GL5537 [7], експериментально виміряну характеристику  $\lg R (\lg E)$  одного з яких, подану в логарифмічній формі, показано на рис. 3.

Функція відгуку фоторезистора  $\lg R (\lg E)$  має лінійну ділянку, у межах якої може бути описана рівнянням:

$$\lg R = \lg R_T - \alpha \cdot \lg E, \quad (2)$$

де  $R$  – опір фоторезистора,  $R_T$  – темновий опір фоторезистора,  $E$  – освітленість світлочувливої майданчика фоторезистора,  $\alpha$  – тангенс кута нахилу лінійної ділянки залежності  $\lg R (\lg E)$ .

Вираз (2) може бути записано в лінійному вигляді:

$$R = \frac{R_T}{E^\alpha}.$$

Таким чином, при активному джерелі оптичного випромінювання, опори фоторезисторів визначатимуться співвідношеннями

$$R_1 = \frac{R_{T1}}{E_1^{\alpha_1}},$$

звідки

$$E_1 = \left( \frac{R_{T1}}{R_1} \right)^{\frac{1}{\alpha_1}}. \quad (3)$$

У свою чергу, вираз для  $R_2$  з урахуванням (1) і (3) може бути записано у вигляді:

$$R_2 = \frac{R_{T2}}{E_2^{\alpha_2}} = \frac{R_{T2}}{E_1^{\alpha_2}} \cdot \left( \frac{\cos \phi_1}{\cos \phi_2} \cdot g^2 \right)^{\alpha_2},$$

$$R_2 = \frac{R_{T2} \cdot g^{2 \cdot \alpha_2} \cdot \cos^{\alpha_2} \phi_1}{\left( \frac{R_{T1}}{R_1} \right)^{\frac{\alpha_2}{\alpha_1}} \cdot \cos^{\alpha_2} \phi_2} = R_1^{\frac{\alpha_2}{\alpha_1}} \cdot \frac{R_{T2}}{R_{T1}^{\frac{\alpha_2}{\alpha_1}}} \cdot \left( \frac{\cos \phi_1}{\cos \phi_2} \cdot g^2 \right)^{\alpha_2}. \quad (4)$$

Таким чином, у разі використання фоторезисторів з близькими характеристиками ( $R_{T1} = R_{T2}$ ,  $\alpha_1 = \alpha_2$ ) та їхнього однакового встановлення відносно джерела оптичного випромінювання ( $\phi_1 = \phi_2$ ,  $r_1 = r_2$ ), опори фоторезисторів  $R_1$  і  $R_2$  дорівнюватимуть, що дає змогу, задаючи опір  $R_1$  шляхом зміни яскравості джерела оптичного випромінювання, отримати аналогічну зміну опору  $R_2$ .

У загальному випадку, взаємозв'язок величин опору зворотного зв'язку  $R_1$  і вихідного опору  $R_2$  описується виразом (4), який для зручності подальшого використання може бути записано у вигляді:

$$R_2 = \eta \cdot R_1^{\frac{\alpha_2}{\alpha_1}},$$

де

$$\eta = \frac{R_{T2}}{R_{T1}^{\frac{\alpha_2}{\alpha_1}}} \cdot \left( \frac{\cos \phi_1}{\cos \phi_2} \cdot g^2 \right)^{\alpha_2} = const. \quad (5)$$

Для проведення експериментальних досліджень використано макет перетворювача напруги в опір, детально описаний в [4, с. 60]. Для експериментального визначення взаємозв'язку величин опорів фоторезисторів  $R_1$  і  $R_2$ , а також для оцінювання впливу розкиду параметрів фоторезисторів і коректності їхнього встановлення відносно джерела оптичного випромінювання на точність роботи перетворювача, виготовлено новий оптико-електронний блок. В оптико-електронному блоці передбачено можливість оперативної заміни, переміщення та повороту фоторезистора  $R_2$  (для зміни в процесі досліджень значень  $R_{T2}$ ,  $\alpha_2$ ,  $\phi_2$ ,  $g$ ). Вигляд монтажної плати оптичного блока без світлозахисного корпусу показано на рис. 4.

На рис. 5 показано одну з безлічі експериментально отриманих залежностей  $R_2 (R_1)$  у разі використання фоторезисторів з різними

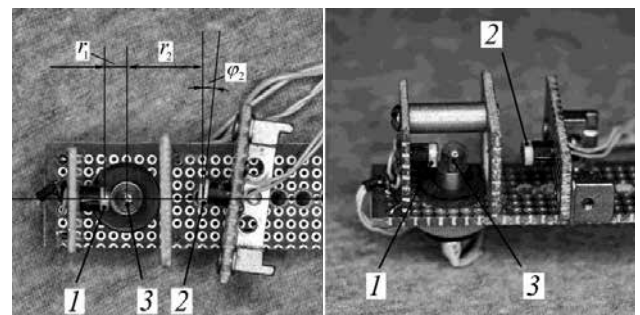


Рис. 4. Фотографія монтажної плати оптико-електронного блока без світлозахисного корпусу:  
 1 – фоторезистор зворотного зв'язку  $R_1$ ;  
 2 – вихідний фоторезистор  $R_2$ ; 3 – джерело оптичного випромінювання (лампа розжарювання)

характеристиками та їхнім різним встановленням відносно джерела оптичного випромінювання.

Експериментально отримана залежність добре апроксимується виразом (5), при цьому рівняння лінії тренду можна записати у вигляді  $R_2 = 12,173 \cdot R_1^{1,2995}$ , за похибки апроксимації, що не перевищує 1,5 %.

За допомогою макета перетворювача, описаного в [4, с. 60], оснащеного новим оптико-електронним блоком, проведено оцінювання впливу розкиду параметрів фоторезисторів і коректності їхнього встановлення відносно джерела оптичного випромінювання на точність роботи перетворювача. Одну з експериментально отриманих функцій відгуку перетворювача показано на рис. 6. На тому ж рисунку показано похибки перетворення  $\delta_{R_{OUT}}$  без використання в схемі додаткових коригувальних елементів. Похибку обчислювали відносно лінійного опису функції відгуку перетворювача, що описується рівнянням (6) [5, с. 108; 8, с. 18].

Таким чином, використання фоторезисторів з різними характеристиками та їх різним встановленням відносно джерела оптичного випромінювання в перетворювачі напруга-опір, описаному в [4, с. 60], може призвести до суттєвих похибок перетворення, для запобігання чого в електронному тракті повинна вводитися додаткова коригувальна поправка.

Передавальна функція перетворювача напруга-опір, що розглядається, з урахуванням того, що фоторезистор оптико-електронного блоку  $R_2$  є одночасно і вихідним фоторезистором усього перетворювача  $R_{OUT}$ , повинна бути лінійною і мати вигляд:

$$R_{OUT} = R_2 = k \cdot U_{IN}, \quad (6)$$

де  $U_{IN}$  – вхідна керівна напруга.

Для реалізації цього, система керування повинна забезпечувати зміну величини опору вимірювального фоторезистора відповідно до залежності:

$$R_1 = \left( \frac{k \cdot U_{IN}}{\eta} \right)^{\frac{\alpha_1}{\alpha_2}},$$

або

$$U_1 \cdot I_1 = \left( \frac{k \cdot U_{IN}}{\eta} \right)^{\frac{\alpha_1}{\alpha_2}}, \quad (7)$$

де  $U_1$  – напруга на фоторезисторі  $R_1$ ;  $I_1$  – струм, що протікає через фоторезистор  $R_1$ .

У разі забезпечення стабільності струму, що протікає через фоторезистор  $R_1$ , вираз (7) може бути записано у вигляді:

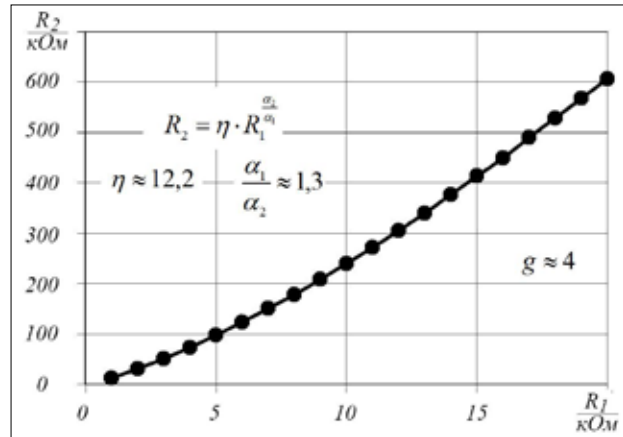


Рис. 5. Експериментально виміряна залежність  $R_2 (R_1)$

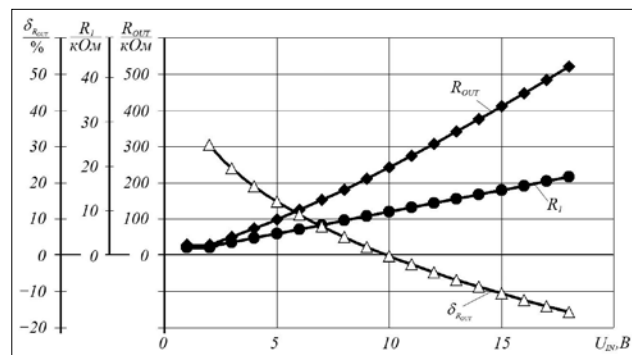


Рис. 6. Експериментально виміряна функція відгуку оптико-електронного перетворювача  $R_{OUT}(U_{IN})$  без додаткових коригувальних елементів

$$U_1 = \xi \cdot U_{IN}^\beta,$$

де  $\beta = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}$ ,

$$\xi = \frac{R_{T1} \cdot \left( \frac{k}{R_{T2}} \right)^{\frac{\alpha_1}{\alpha_2}}}{I_1 \cdot \left( \frac{\cos \phi_1}{\cos \phi_2} \cdot g^2 \right)^{\alpha_1}} = const. \quad (8)$$

Таким чином, система керування має контролювати падіння напруги на фоторезисторі  $R_1$  та змінювати яскравість джерела оптичного випромінювання до моменту виконання умови (8).

На рис. 7 показано функціональну схему перетворювача напруга-опір, у якому скомпенсовано похибки, спричинені використанням фоторезисторів з характеристиками, що відрізняються, та різним встановленням відносно джерела оптичного випромінювання.

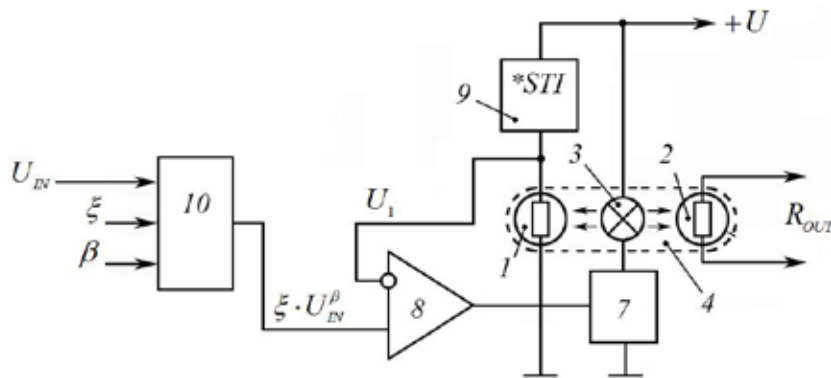


Рис. 7. Функціональна схема перетворювача напруга-опір з коригувальними елементами:

1 – фоторезистор зворотного зв’язку; 2 – вихідний фоторезистор; 3 – джерело оптичного випромінювання (лампа розжарювання); 4 – оптико-електронний блок; 7 – регулятор яскравості (у макеті використано біполярний транзистор); 8 – диференціальний підсилювач; 9 – стабілізатор струму; 10 – аналоговий обчислювач

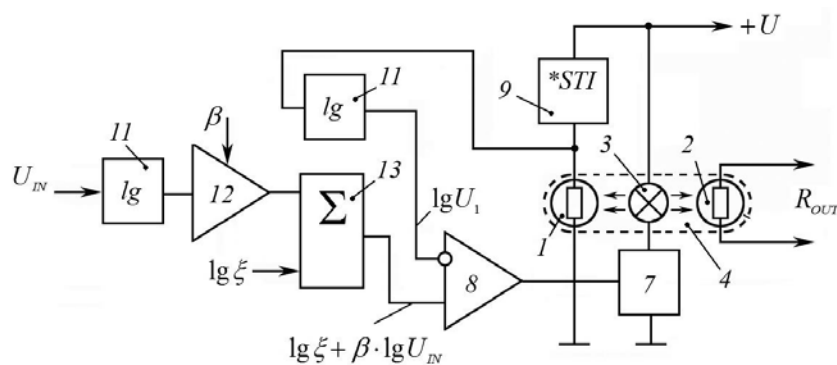


Рис. 8. Функціональна схема перетворювача напруга-опір із розв’язанням рівняння в логарифмічному вигляді:

1 – фоторезистор зворотного зв’язку; 2 – вихідний фоторезистор; 3 – джерело оптичного випромінювання (лампа розжарювання); 4 – оптико-електронний блок; 7 – регулятор яскравості; 8 – диференціальний підсилювач; 9 – стабілізатор струму; 11 – логарифмічний підсилювач; 12 – підсилювач із регульованим коефіцієнтом підсилення; 13 – підсилювач, що підсумовує

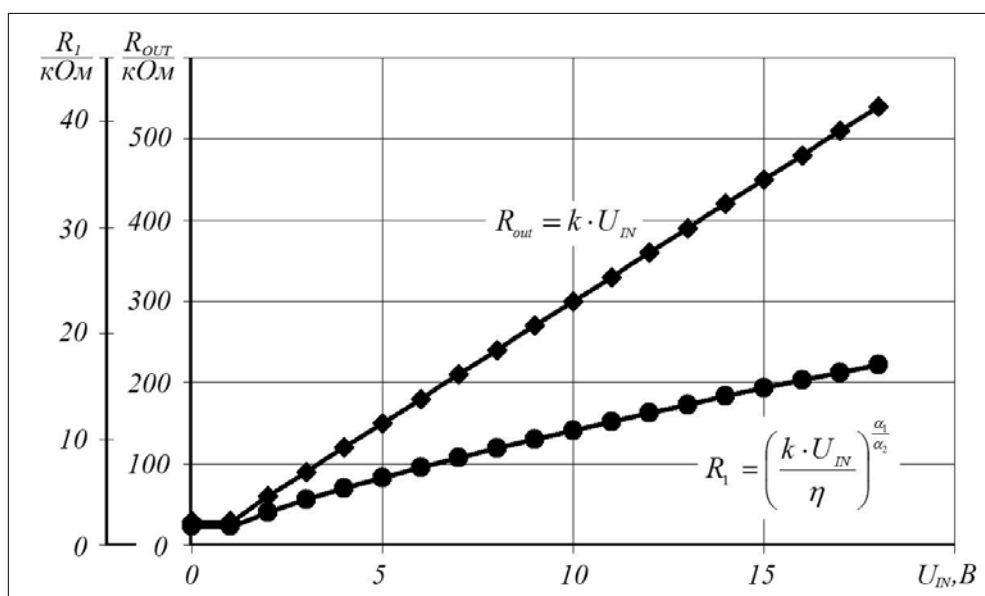


Рис. 9. Функція відгуку перетворювача напруги в опір із коригувальною поправкою



Для спрощення практичної реалізації залежності (8), вираз може бути записано в логарифмічному вигляді:

$$\lg U_1 = \lg \xi + \beta \cdot \lg U_{IN}. \quad (9)$$

Функціональну схему перетворювача напруга-опір, у якому розв'язується рівняння (9) у логарифмічному вигляді, показано на рис. 8.

Графіки, показані на рис. 9, ілюструють роботу оптико-електронного перетворювача інформаційного сигналу (напруги) в опір із введенням коригувальної поправки, що забезпечує лінійність функції відгуку перетворювача. Похибка перетворення, яка визначається насамперед точністю введення коригувальної поправки, отримана в результаті експериментальних досліджень, не перевищила 1,6 %.

Надалі планується експериментально дослідити ефективність застосування різних варіантів автоматичного обліку коригувальних поправок.

**Висновки.** У даному дослідженні:

1. Проведено оцінку впливу розкиду параметрів фоторезисторів і коректності їхнього встановлення відносно джерела оптичного випромінювання на точність роботи оптико-електронного перетворювача інформаційного сигналу у вигляді напруги в опір, призначеного для імітації потенціометричного датчика стану контрольованої системи. Показано, що використання вихідного фоторезистора з різними характеристиками та їх

різним встановленням відносно джерела оптичного випромінювання в перетворювачі напруга-опір може призвести до суттєвих похибок перетворення.

2. Для експериментального визначення взаємозв'язку величин опорів фоторезисторів, а також для оцінювання впливу розкиду параметрів фоторезисторів і коректності їхнього встановлення відносно джерела оптичного випромінювання на точність роботи перетворювача, до діючого макету перетворювача напруги в опір виготовлено оптико-електронний блок, в якому передбачено можливість оперативної заміни, переміщення і повороту вихідного фоторезистора.

3. Експериментально визначено взаємозв'язок параметрів фоторезисторів, що мають розкид характеристик і відмінності в їх установці відносно джерела оптичного випромінювання.

4. Експериментально показано, що введення поправки на схемотехнічному рівні дає змогу підвищити точність перетворювача в разі застосування в них фоторезисторів, які мають розкид параметрів і відмінності в їхньому встановленні відносно джерела оптичного випромінювання. Похибка перетворення в результаті введення коригувальної поправки за результатами експериментальних досліджень не перевищує 1,6 %. Показано, що похибка перетворення в цьому випадку визначається, насамперед, точністю введення коригувальної поправки.

#### Список літератури:

1. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування : підручник, Київ : Либідь, 2007. 656 с.
2. Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О., Крашельницький В.В. Мехатроніка : підручник, Київ : НУБіП України, 2020. 404 с.
3. Півторак Д.О., Павловський О.М., Платов І.М. Перетворювач інформаційного сигналу в опір для системи автоматичного контролю. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2021. № 6 (159). С. 9–13. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-159-6-9-13>
4. Півторак Д.О., Павловський О.М., Цибульник С.О. Експериментальні дослідження перетворювача для системи автоматичного контролю. *Вісник КПІ. Серія приладобудування*. 2022. № 63 (1). С. 58–63. [https://doi.org/10.20535/1970.63\(1\).2022.260643](https://doi.org/10.20535/1970.63(1).2022.260643)
5. Півторак Д.О., Цибульник С.О. Експериментальні дослідження характеристик перетворення оптико-електронним модулем системи автоматичного контролю. *Вісник КПІ. Серія приладобудування*. 2023. № 65 (1). С. 104–109. [https://doi.org/10.20535/1970.65\(1\).2023.283451](https://doi.org/10.20535/1970.65(1).2023.283451)
6. Кушлик Р.В., Яковлев В. Ф., Куценко Ю. М., Лисиченко М. Л., Кунденко М. П., Федюшко Ю. М. Електричне освітлення та опромінення : навч. посіб. Харків : ТОВ «Планетапрінт», 2016. 332 с.
7. LTD. GL55 Series Photoresistor – datasheet (Technical report). Senba Optical and Electronic Co., [Online]. Available: <https://blackchip.com.ua/image/catalog/pdf/fotore sustor/GL55.pdf>
8. Лавренова Д.Л., Хлистов В.М. Основи метрології та електричних вимірювань : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 123 с.

**Pivtorak D.O., Tsybulnyk S.O., Pavlovskii O.M. OPTIC-ELECTRONIC CONVERTER OF INFORMATION SIGNAL INTO RESISTANCE FOR AUTOMATIC CONTROL SYSTEM**

*To simulate the potentiometric sensor of the automatic process control system, it is proposed to use a modified optic-electronic voltage-to-resistance converter, which has a galvanic isolation of the output and a linear characteristic within a given range of output resistance change. The principle of operation of the converter is based on the change in the resistance of photoresistors under the influence of optical radiation coming from the controlled source. The optical unit of the converter contains an optical radiation source and two photoresistors simultaneously directed at it. The signal from one photoresistor is the output signal, and the signal from the second photoresistor is analysed by the control circuit, which, through the brightness regulator, synchronously changes the illumination on the photosensitive areas of the photoresistors depending on the level of the control voltage and the corrective adjustment. The use of photoresistors with different characteristics, as well as differences in their installation relative to the optical radiation source, leads to a violation of the linearity of the converter response function and a significant decrease in the accuracy of its operation. The dependences describing the relationship between the parameters of photoresistors having a scatter of characteristics and differences in their installation relative to the source of optical radiation, confirmed experimentally, are obtained in the paper. It is shown that modification of the known optic-electronic converter by introducing a correction at the circuit level allows to increase the conversion accuracy. An expression for the response function of the modified voltage-to-resistance converter is obtained. The conversion error as a result of the introduction of the corrective adjustment, according to the results of experimental studies, does not exceed 1.6 %. It is shown that the conversion error in this case is determined, first of all, by the accuracy of the introduction of the corrective adjustment.*

**Key words:** *transducer, resistance, signal, photoresistor.*

**Platov I.M.**

National Technical University of Ukraine “Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute”

**Pavlovskiy O.M.**

National Technical University of Ukraine “Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute”

## JUSTIFICATION FOR THE CONTROL SYSTEM FOR VERTICAL MOVEMENT OF A SMALL-SIZED WALKING ROBOT

*The article substantiates and develops a system for controlling the vertical movement of a walking hexapod robot. Typically, the vertical movement of walking robots is achieved through various fixation devices, suction cups, magnets, hydraulic or pneumatic devices, which ensure the contact of the leg and the surface. Recent developments in this field focus on vertical movement through the friction forces between the legs and the surface. Thus, there is no need to use additional equipment and complicate the design. However, such movement requires the development of more complex algorithms.*

*A review of the literature demonstrates the feasibility of such a movement method only in laboratory conditions with a predefined wall configuration. Therefore, an analysis of various scenarios, most closely resembling real conditions, was conducted, and key factors that the control system must consider were identified. Based on this analysis, it was concluded that the most significant situations are when the hexapod platform is in horizontal and vertical positions. In such cases, the movement is divided into two separate tasks, the resolution of which is mandatory for forming vertical movement algorithms. According to the defined requirements, a mathematical model was built, which considers the shift of the robot's center of mass, especially important for lifting useful loads.*

*Additionally, since the real environment is inherently uncertain, the walking robot needs to be equipped with a vision system.*

*To verify the system's performance, a series of test climbs with different scenarios were conducted, namely: vertical climbing when the platform is parallel/perpendicular to the walls, and straight-line movement between two walls.*

*The test results confirmed the performance of the proposed system and identified ways for further development.*

**Key words:** control system, robot, inclinometer, vision system, hexapod, vertical movement, mathematical model, center of mass, kinematics.

**Introduction.** Today, there are many developments and algorithms for small-sized walking robots. The scope of which covers a wide range of needs, in particular, for the movement of the robot over rough terrain, on flat horizontal surfaces, there are also the development of mathematical models that take into account deformations not only of robot structures, but also of the surface, which in turn makes it possible to increase the stability of the robot during movement [1].

It is important to note that the appearance of available and inexpensive components, in particular, miniature servomotors, made it possible to implement many designs, the most common of which are: hexapods – have six limbs and quadropods – have four limbs. The latter, although structurally simpler, have a significant drawback – worse stability on uneven surfaces. They also require the development of more complex algorithms to stabilize the platform, which complicates development and makes it more

expensive [2; 3]. Therefore, in this work, the main attention is paid to the hexapod control system.

Recently, there have been attempts to implement vertical movement due to the friction forces of the limbs against the surface on which the robot climbs. The main difference of this method is its increased algorithmic complexity, but unlike existing designs, most of which are implemented on the basis of vacuum suction cups or electromagnets, it does not require changes to the design. The latter should take into account additional loads on the servomotors that occur during lifting, deformation of the limbs and platform, surface deformation, etc.

*Analysis of recent research and publications.* Among the existing works devoted to the implementation and research of the vertical movement of the hexapod due to the frictional forces of the limbs and the surface on which the robot moves, the following can be distinguished:

In the paper [4], the authors propose to consider each limb of the hexapod as a separate manipulator. The sum of the stiffnesses of each limb will be the stiffness of the entire structure and, accordingly, on the basis of this, it is possible to calculate the deformations of the entire structure. Assuming, of course, that the platform is absolutely rigid. Based on this, they obtained the stiffness matrix of the entire system, compensated for the deformation of the walls between which the robot moved and determined what force is necessary to keep it at a height between the walls. Since vertical movement is more complex than horizontal movement and there are many factors that can cause the robot to fall or slip, the authors suggested introducing a safety factor that takes into account insufficient friction and motor torque. The developed techniques were tested on a pre-programmed course. The developers investigated the case with parallel walls, non-parallel walls, investigated the effectiveness of different types of gait from the point of view of safety and reliability of the contact of the robot's limbs with the walls. Correction of inclinations that necessarily occur during ascent was done with the help of an IMU and a PID controller.

The work [5] is aimed at developing the previous methods, in particular, they developed a hexapod motion planner that can solve the problems of climbing between non-parallel walls, bypassing an obstacle between two walls. The authors verified the methods through a series of tests that showed their effectiveness. However, in this case, the geometry of the walls and obstacles was primarily known, so it is impractical to apply the development data outside of laboratory conditions.

In the article [6], the implementation of a motion planner algorithm is presented. The planner is also implemented using nonlinear programming to solve the problem of determining the robot's pose and forces with guaranteed limited risk. The maximum adhesion forces are modeled as a Gaussian distribution. The disadvantages of tripodal gait for vertical movement are investigated according to the mathematical model, as well as movement between heterogeneous walls, i.e., with sections of different surfaces. The design of the leg, which the authors developed to improve surface grip, is presented. As in previous works, the gait was primarily programmed with all geometric parameters of the walls known in advance.

In the work [7], the authors improved the movement algorithm for navigating between walls with protrusions, as well as climbing inside a circular pipe. Additionally, the transition of the hexapod from

a flat surface (ground) to a vertical direction (moving between two walls) was investigated.

Taking into account the existing developments, it can be concluded that at the moment vertical movement due to frictional forces needs refinements, namely: implementation of the operation of the hexapod in previously undefined conditions, which was not done in the considered works, in addition, the proposed algorithms require a fairly powerful computing core, which in turn makes it difficult to use hexapods for vertical lifting outside of laboratories and test equipment. Existing developments lack a vision system that can assess the environment and provide information about the geometry of the space and the objects in it. The review of the state of the problem, which was carried out in [8], demonstrates in general the ways of development of hexapod walking robots for vertical movement. Accordingly, for a better disclosure of the research topic, each aspect of the development needs a more detailed consideration.

**Problem statement.** Existing developments take into account many of the listed needs, but real-world application requires a systematic approach that will allow the work to work autonomously, and not only in given laboratory conditions and scenarios. Therefore, this work proposes to improve the existing developments, based on which a control system was created for the vertical movement of the hexapod due to the frictional forces of the limbs and the surface.

**Analysis of typical hexapod movement scenarios.** First of all, let's consider several scenarios that can occur in real conditions. From a review of the existing works, it can be seen that some of the possible options have already been considered, but there are many spatial configurations and types of surfaces that cannot be taken into account in full at the development stage. But, despite this, it is quite enough to consider typical situations that reflect real structures that are widely used in industry (ventilation shafts, channels, etc.), in speleology, etc. For example, in fig. 1 shows the possible configurations of the two walls along which the hexapod can move.

The given configurations can be combined, that is, for example, have an uneven surface, as well as holes or branches, etc. The difficulty of developing movement algorithms is that for error-free operation in this case, it is necessary to take into account a large number of various factors. As mentioned in [8], the structural component is very important for vertical movement, because it determines the conditions under which the robot will be able to lift. If the design

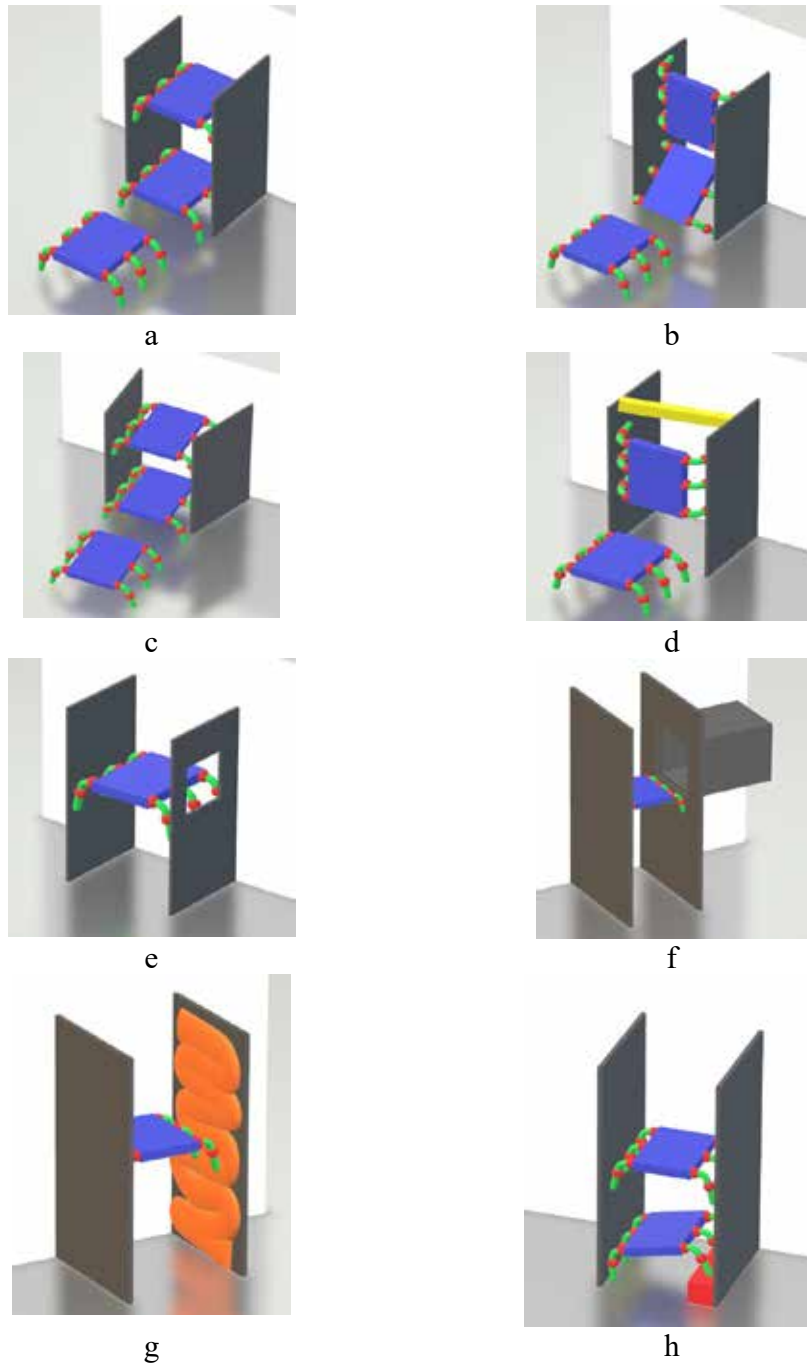
is too large, it limits, and in some cases makes it impossible, movement in spaces that are tight enough for maneuvers or bypassing obstacles.

**Control system development.** Taking into account the displacement of the center of mass (CoM) of the entire robot is a very important factor, neglecting which it is difficult and sometimes impossible to control the robot for vertical movement, especially if a payload is installed on it.

The center of mass of the hexapod can be calculated using the following formulas:

$$X_c = \frac{1}{m_r} \sum m_j x_j; Y_c = \frac{1}{m_r} \sum m_j y_j; Z_c = \frac{1}{m_r} \sum m_j z_j. \quad (1)$$

Where  $X_c, Y_c, Z_c$  are the coordinates of the CoM of the robot,  $m_r$  is the mass of the robot,  $m_j$  is the mass of the  $j$ -th structural element,  $x_j, y_j, z_j$  are the coordinates of the  $j$ -th structural element.



**Fig. 1. Possible spatial configurations of the walls between which the hexapod moves:**

a – robot platform parallel to the ground; b – perpendicularly; c – non-parallel walls; d – the presence of an obstacle between the walls; e – the presence of a hole, a bulge or a depression; f – the presence of branching (one or on several sides); g – uneven wall surface; h – obstacle or a step below the walls

In this case, the movement algorithm must take into account not only the geometry of the surrounding space but also the displacement of the robot's center of mass. This is especially important for vertical lifting, as too much inclination of the platform will lead to displacement of the CoM and redistribution of loads to the actuators, which in turn can lead to a loss of grip of the limbs on the surface and a fall of the hexapod. If you look at fig. 1a, it can be seen that with this arrangement of the robot between the walls, a kind of shoulder is created, on which the force of gravity acts, and if we add to this the possibility of carrying the payload, then the force of pressing the limbs may not be enough. At the same time, in the position shown in fig. 1 b, the hexapod can move freely without falling, having the same components in its design. This suggests that hexapod lifting can be divided into solving two problems: lifting when the platform is parallel to the ground, the platform is perpendicular or at an angle to the ground – two fundamentally different problems, each of which requires a separate approach.

It is convenient to construct the kinematic diagram of the hexapod using 3x3 rotation matrices. At the same time, we will define several construction rules:

- 1) Z axis is always directed upwards.
- 2) Y axis is located perpendicular to the limb and coincides with the direction of the Y axis of the platform coordinate system.
- 3) X- axis is always directed along the limb.

Thus, for one limb, the joint coordinate system will have the following form (Fig. 2).

Such a kinematic scheme realizes the rotation of the limb in the horizontal plane (joint J<sub>1</sub>) and the lifting of the joints (J<sub>2</sub>, J<sub>3</sub>) in the vertical plane. Thus, 3 degrees of freedom are created.

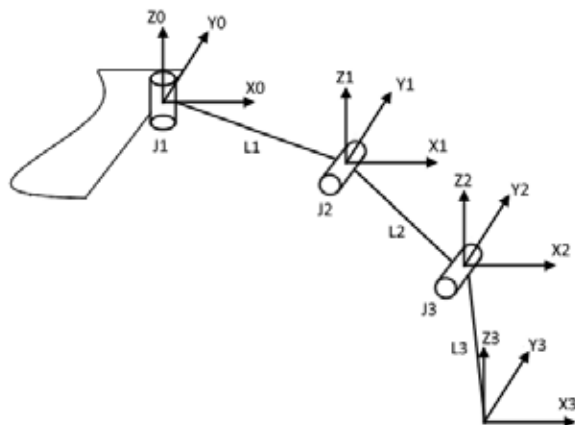


Fig. 2. Coordinate systems of limb joints  
L<sub>1-3</sub> – link lengths

The orientation of the limb and the coordinates of the foot relative to the center of mass of the platform will be determined by a three-dimensional displacement vector relative to the coordinate system of the platform, while we assume that the origin of the coordinates coincides with the center of mass of the latter. The coordinate systems of the platform and the joints of the limb are marked (simplified) in fig. 3.

Displacement X<sub>0</sub> Y<sub>0</sub> Z<sub>0</sub> relative to X<sub>p</sub> Y<sub>p</sub> Z<sub>p</sub> are determined at the stage of design development and can be determined from drawings or, directly, measured. To determine the coordinates in space for other joints, we will apply rotation matrices (2)–(4):

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & -\sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & 0 & -\sin(\gamma) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\gamma) & 0 & \cos(\gamma) \end{bmatrix}; \quad (4)$$

A<sub>1</sub> is the rotation matrix of joint J<sub>1</sub> around the vertical axis Z<sub>0</sub>, A<sub>2</sub> and A<sub>3</sub> are the rotation matrices of joints J<sub>2</sub> and J<sub>3</sub> around the axis Y. α, β, γ – turning angles, respectively.

When placing the limbs, as shown in fig. 3, it is convenient to conventionally divide the platform into left and right sides, because it is rectangular and all limbs are placed symmetrically. This separation will facilitate further operations with the numbering of limbs and their indices. The designations are shown in fig. 4.

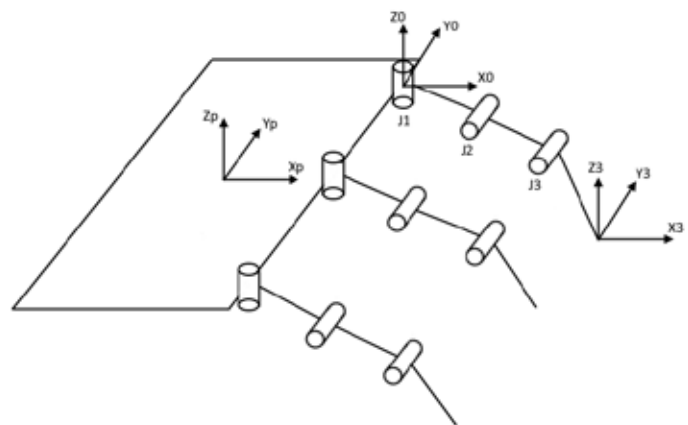


Fig. 3. Coordinate systems of the platform and joints of the limb

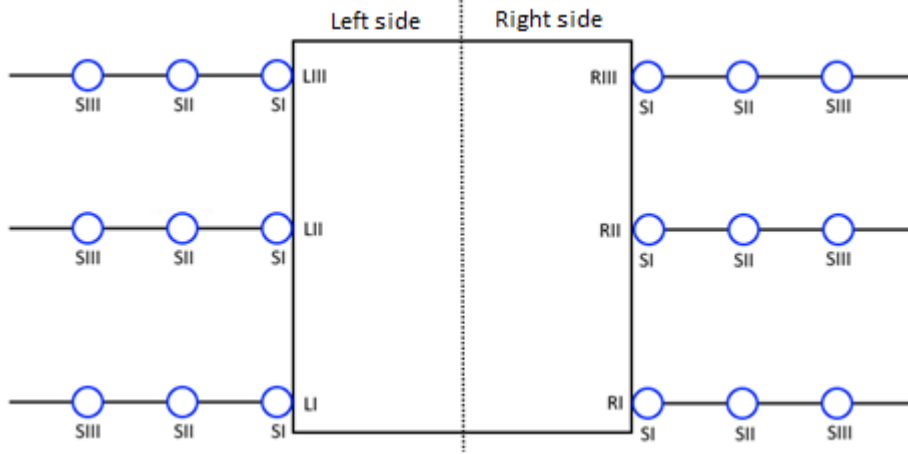


Fig. 4. Conventional designation of hexapod limbs

$L_{I-III}$  – numbers of limbs on the left side of the platform,  $R_{I-III}$  – limb numbers on the right side of the platform,  $S_{I-III}$  – numbers of servomotors

The coordinates of the  $S_{i\text{axes}}$  of the servomotors, which are rigidly connected to the platform, relative to the center of the platform will be determined as (5):

$$L_i S_i = \begin{bmatrix} X_{L_i S_i} \\ Y_{L_i S_i} \\ Z_{L_i S_i} \end{bmatrix}; R_i S_i = \begin{bmatrix} X_{L_i S_i} \\ Y_{L_i S_i} \\ Z_{L_i S_i} \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$i = I \dots III$

As the center of mass of the servo motor, we take its geometric center. Knowing the displacement relative to the axis (joint), which is determined by measurement or from construction drawings, it is possible to determine the CoM coordinates of these servomotors. We denote this displacement as:

$$\begin{bmatrix} X_{L_i S_i}^* \\ Y_{L_i S_i}^* \\ Z_{L_i S_i}^* \end{bmatrix}$$

and add to (5). Thus, the CoM of servomotors rigidly connected to the platform will be determined as follows (6):

$$CoM_{L_i S_i} = L_i S_i + \begin{bmatrix} X_{L_i S_i}^* \\ Y_{L_i S_i}^* \\ Z_{L_i S_i}^* \end{bmatrix}; CoM_{R_i S_i} = R_i S_i + \begin{bmatrix} X_{L_i S_i}^* \\ Y_{L_i S_i}^* \\ Z_{L_i S_i}^* \end{bmatrix}; \quad (6)$$

It is convenient to determine the coordinates of the joints using a direct problem of kinematics, for this we use the rotation matrices (2)–(4) and the coordinates of the joints (5), we get (7):

$$\begin{aligned} L_i S_{II} &= A_1 - L_1 + L_i S_i; \\ L_i S_{III} &= A_1 \cdot A_2 - L_2 + L_i S_{II}; \\ L_i T &= A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 - L_3 + L_i S_{III}; \\ R_i S_{II} &= A_1^{-1} \cdot L_1 + R_i S_i; \\ R_i S_{III} &= A_1^{-1} \cdot A_2^{-1} \cdot L_2 + R_i S_{II}; \\ R_i T &= A_1^{-1} \cdot A_2^{-1} \cdot A_3^{-1} \cdot L_3 + R_i S_{III}, \end{aligned} \quad (7)$$

where  $L_i T$ ,  $R_i T$  are the coordinates of the foot of the limb.

The CoM of other servomotors is determined by taking into account the displacement from the axis of rotation of the servomotor to its CoM (8):

$$\begin{aligned} CoM_{L_i S_k} &= L_i S_k + \begin{bmatrix} X_{L_i S_k}^* \\ Y_{L_i S_k}^* \\ Z_{L_i S_k}^* \end{bmatrix}; \\ CoM_{R_i S_k} &= R_i S_k + \begin{bmatrix} X_{R_i S_k}^* \\ Y_{R_i S_k}^* \\ Z_{R_i S_k}^* \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (8)$$

Where  $k = II \dots III$ .

Taking into account (1) and (6), (8), the formulas for calculating CoM take the final form (9):

$$CoM_r = \begin{bmatrix} Xc \\ Yc \\ Zc \end{bmatrix} = \frac{m_j \cdot (CoM_{L_i S_i} + CoM_{R_i S_i} + CoM_{L_i S_k} + CoM_{R_i S_k})}{m_r}. \quad (9)$$

It is worth noting that in this case, the mass of the links and the foot was neglected, since their weight is much less than the weight of the servo motor. Thus, at given angles of rotation of the limbs,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  it is possible to determine the coordinates of each joint and foot of the robot, as well as its CoM.

Knowing the coordinates of all the feet and CoM, as well as the angle of inclination of the platform, for example, according to the readings of the inclinometer, it is possible to build a stabilization and orientation system that will ensure stability during vertical movement. A simplified functional scheme is shown in Fig. 5.

As the primary source of information about the possibility of further movement, the vision system works, which signals whether further movement is possible, if so, then information about the geometry of the surrounding space is supplied to the stabilization system. Data preprocessing implements data filtering and storage. Factory parameters about the initial positions of the limbs and geometric data of the hexapod are read out by the stabilizer. In addition, the angle of inclination of the platform is calculated to determine its orientation relative to the walls between which the hexapod rises. In addition, in the process of lifting, the inclinometer adjusts the position of the limbs and, accordingly, the platform, because during the lifting, distortions of the latter occur due to the errors of the servomotors.

**Experimental research.** For experimental studies, a test stand and a model of a walking hexapod robot were built. MG-995 servomotors with a torque of 0.5 Nm and an ATmega328 microcontroller were used to build the model. The inclinometer is implemented

on the basis of the ADXL-335 accelerometer. The vision system is a combination of ultrasonic SR-04 and infrared VL53L0X sensors [9]. For vertical lifting, a tripod gait was used (when with each step, three limbs are in a state of transfer, and the other three are pressed against the walls). The results of the experimental run are shown in fig. 6 a, b.

In this case, the vision system scans the walls and determines their geometric dimensions. In this way, the control system automatically determines the angles of deviation of the limbs necessary for holding the robot and its movement, as well as corrects the tilt of the platform. It can be seen that the developed system works in both cases, but currently it does not take into account the presence of obstacles and other situations that were shown in Fig. 1. Therefore, it needs revisions, which will be presented in further works.

**Conclusions.** This work is devoted to the development of a control system for a hexapod walking robot for vertical movement due to the frictional forces of the limbs and the surface. Unlike existing developments, this type of movement does not require special devices that ensure contact between the limbs and the surface. However, more complex movement algorithms need to be developed, since there are more components that need to be taken into account, unlike moving in the horizon. A review of existing developments showed that currently there are no solutions that would allow the robot to work autonomously in an uncertain environment, all attempts to implement vertical movement are limited to laboratory conditions and pre-programmed actions,

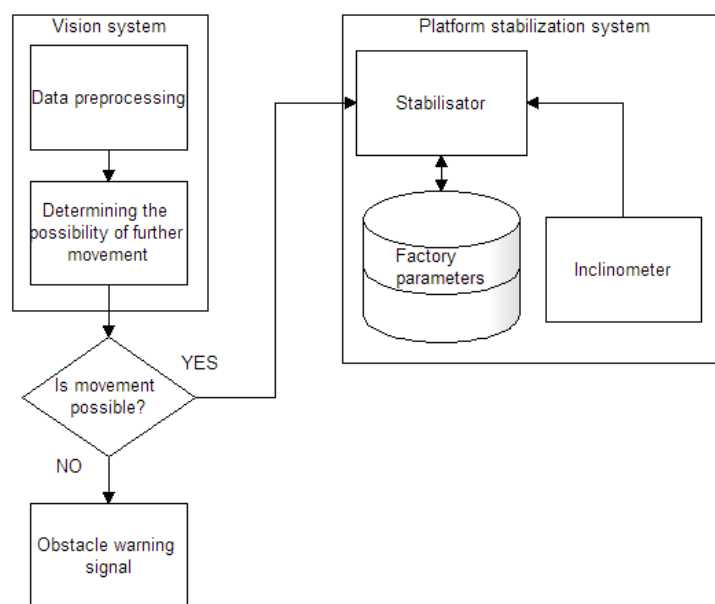
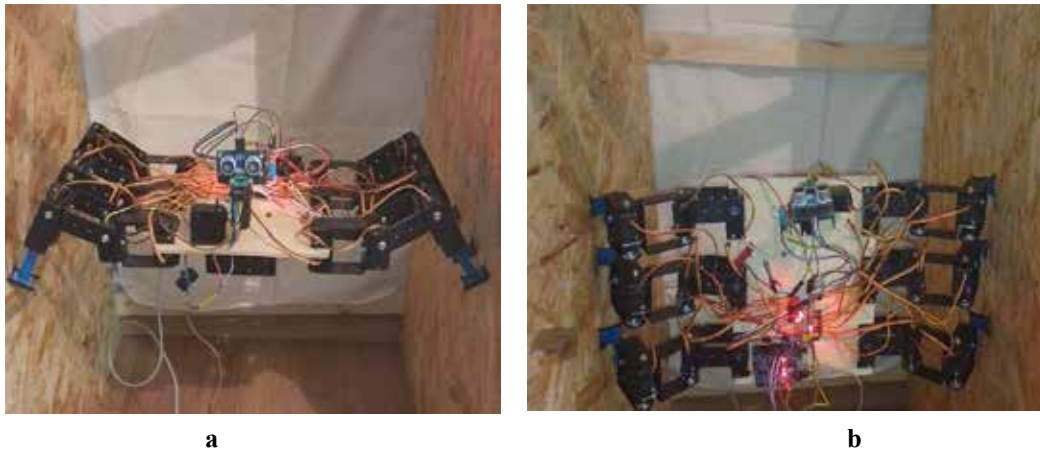


Fig. 5. Simplified platform stabilization system during vertical movement





**Fig. 6. Vertical lifting of the hexapod:**  
a – platform parallel to the ground, b – platform perpendicular to the ground

therefore, in this work, a hexapod control system was developed for its lifting due to frictional forces in uncertain conditions.

The vision system determines the geometric parameters of the environment, thanks to which the robot can make decisions precisely in uncertain conditions. Lidar data is pre-processed and based on this, further decisions are made regarding overcoming obstacles or returning to the initial position or informing the operator about an impassable obstacle. The developed stabilizer calculates the displacement of the center of mass of the platform, on the basis

of which the balance control is implemented, which protects the work from falls. In addition, the inclinometer determines the orientation of the platform, which makes it possible to climb not only when the platform is parallel to the walls, but also when it is perpendicular. This greatly improves the ability to avoid obstacles.

Experimental studies have confirmed the functionality of the system, but currently it takes into account only some of the possible configurations of the space and needs refinements, which will be covered in future works.

#### References:

1. Fang G., Cheng J. Advances in Climbing Robots for Vertical Structures in the Past Decade: A Review. *Bio-mimetics*. 2023. № 8 (1) P. 47.
2. Walking Hexapod for Demining Territory of Postwar Ukraine. General Recommendations / I. Platov et al. *GeoTerrace-2023 : International Conference of Young Professionals*. Lviv, 2023. P. 1–5.
3. Platov I., Pavlovskiy O., Pavlovska Y. Hexapod movement algorithms to avoid interference. *Angular movement. Bulletin of Kyiv Polytechnic Institute. Series Instrument Making*. 2021. № 62 (2). P. 58–64.
4. Multi-Limbed Robot Vertical Two Wall Climbing Based on Static Indeterminacy Modeling and Feasibility Region Analysis / X. Lin et al. *IEEE RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Madrid, 2018. P. 4355-4362.
5. Optimization Based Motion Planning for Multi-Limbed Vertical Climbing Robots / X. Lin et al. *IEEE RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Macau, 2019. P. 1918–1925
6. Y. Shirai, X. Lin, Y. Tanaka, A. Mehta and D. Hong. Risk-Aware Motion Planning for a Limbed Robot with Stochastic Gripping Forces Using Nonlinear Programming. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2020 № 5 (4). P. 4994–5001.
7. Transition Motion Planning for Multi-Limbed Vertical Climbing Robots Using Complementarity Constraints / J. Zhang et al. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Xi'an, 2021. P. 2033–2039.
8. Платов І.М., Павловський О.М. Вертикальний рух малогабаритних крокуючих роботів. Огляд стану проблеми. *Bull. Kyiv Polytech. Inst. Ser. Instrum. Mak.* 2023. № 65 (1). С. 96–103.
9. Використання лазерного датчика відстані VL53L0X для систем зору мобільних роботів. / І. Платов та ін. *Погляд у майбутнє приладобудування : XIII Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених*. Київ, 2020. С. 59–62.

**Платов І.М., Павловський О.М. ОБҐРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВЕРТИКАЛЬНИМ ПЕРЕМІЩЕННЯМ МАЛОГО КРОДУЮЧОГО РОБОТА**

*У статті обґрунтована і розроблена система керування вертикальним рухом крокуючого робота гексапода. Зазвичай вертикальний рух крокуючих роботів реалізується завдяки застосуванню різноманітних фіксуючих засобів, присосок, магнітів, гідравлічних або пневматичних пристроїв, які забезпечують контакт кінцівки та поверхні. Останні розробки в даному напрямку спрямовані на вертикальний рух за рахунок сил тертя кінцівок і поверхні. Таким чином немає необхідності застосовувати додаткове устаткування та ускладнювати конструкцію. Але, натомість, такий рух потребує розробки більш складних алгоритмів.*

*Огляд літературних джерел демонструє працездатність такого способу руху лише в лабораторних умовах і з попередньо заданою конфігурацією стін. Тому був проведений аналіз різноманітних сценаріїв, які найбільш наближені до реальних умов і виокремлені ключові фактори, які має враховувати система керування. На базі проведеного аналізу був зроблений висновок, що найбільш вагомими є ситуації, коли платформа гексапода знаходиться у горизонтальному та вертикальному положеннях. В такому випадку рух розділяється на дві окремі задачі, вирішення яких є обов'язковим для формування алгоритмів вертикального руху. Відповідно до визначених вимог, була побудована математична модель, яка враховує зміщення центра мас робота, що особливо важливо для підйому корисного навантаження.*

*Також, оскільки реальне середовище є апріорно невизначеним, то крокуючого робота необхідно оснащувати системою зору.*

*Для перевірки працездатності системи була проведена серія тестових підйомів з різними сценаріями, а саме: вертикальний підйом, коли платформа паралельна/перпендикулярна до стін, прямолінійний рух між двома стінами.*

*Результати тестів підтвердили працездатність запропонованої системи і визначили шляхи подальшого розвитку.*

**Ключові слова:** система керування, робот, інклінометр, система зору, гексапод, вертикальний рух, математична модель, центр мас, кінематика.

**Редько І.В.**

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

**Сущенко В.С.**

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

## ПРОБЛЕМИ ПОВНОТИ У КЛАСАХ ОБЧИСЛЮВАНИХ ФУНКЦІЙ І ПРЕДИКАТІВ НАД ІМЕННИМИ СТРУКТУРАМИ ДАНИХ

У статті розглянуті алгебраїчні характеристики класів обчислюваних функцій і предикатів над іменними структурами даних. У багатьох дослідженнях обґрунтована їхня роль як універсального засобу специфікації прагматично важливих для програмування структурних типів даних. Основний акцент зроблено на композиційній парадигмі програмування як методологічній основі розгляду методів побудови програм. Примітивні програмні алгебри (ППА) частково-рекурсивних функцій та частково-рекурсивних предикатів над іменними даними представляють об'єкт дослідження. Вибір саме таких структур даних обумовлений їх важливістю та популярністю, як у теоретичному, так і у прикладному програмуванні. Зокрема кортежні та реляційні структури даних грають важливу роль у дослідженнях, пов'язаних з повнотою мов запитів у базах даних. Точні визначення ППА наведені у роботах Редька В.Н., Буя Д.Б., Редька І.В. та інших авторів. Сигнатуру ППА складають операції суперпозиції, галуження та циклування, що уточнюють відомі управляючі структури більшості мов програмування і можуть застосовуватися при розробці прикладних телекомунікаційних програмно-апаратних систем. Особлива увага приділяється побудові ППА-характеристик (породжуючих множин та базисів) класів обчислюваних функцій та предикатів. Це складає предмет статті. Обчислюваність функції (предикату) над ефективно зліченими носіями вводиться як нумераційна обчислюваність, у сенсі робіт Катленда Н. «Обчислюваність. Вступ у теорію рекурсивних функцій», Єршова А.П. «Обчислюваність у довільних областях та базисах» та Єршова Ю.Л. «Теорія нумерацій». Представлена робота присвячена застосуванню алгебраїчного підходу та зокрема, методу ізоморфних специфікацій у дослідженні та розробці прикладних програмних систем. Разом з загальними результатами стосовно іменних даних та функцій, у роботі отримано описи класів кортежних та реляційних обчислюваних функцій та предикатів, визначено відповідні базисні набори функцій та предикатів у ППА.

**Ключові слова:** алгебраїчна характеристика, композиційна парадигма, обчислювана функція, обчислюваний предикат, кортеж, реляція, програмна алгебра, ізоморфізм,  $\text{Itp}$ -базис.

**Постановка проблеми.** Питання, пов'язані з розкриттям семантики мов програмування, відіграють ключову роль в теорії та практиці програмування. Дослідження класів обчислюваних функцій і предикатів над репрезентативними носіями, зокрема, визначення їх алгебраїчних характеристик, складає фундамент для технологізації процесів програмотворення та розвитку засобів коректного програмування. Особливу роль в цих дослідженнях займають іменні структури даних. У [1–4] обґрунтована їх роль як універсального засобу специфікації прагматично важливих для програмування структурних типів даних.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз досліджень і публікацій, що стосуються відомих парадигм програмування, наприклад, функціонального, структурного, модульного, об'єктно-орієнтованого, композиційного програмування, програмних алгебр та програмоло-

гії у цілому [1–3; 5–9] демонструє необхідність переходу у створенні прикладних інформаційних, телекомунікаційних систем, систем інтернету речей від вирішення окремих задач до підходів, способів та методів вирішення класів подібних задач з гарантованою коректністю отримуваних рішень та можливістю їх реалізації на різних синтаксичних програмних платформах.

Прагнення до першого було і залишається спонукальним мотивом створення більшості парадигм програмування. У тому чи іншому вигляді важливість цього знайшла своє відображення, зокрема, у Тьюрінговських лекціях Джона Бекуса, Едсгера Дейкстра, Джона Мак-Карті, Роберта Флойда [9]. Визначні вчені, які внесли вагомий вклад у розбудову засад у тому числі і комп'ютерної науки та програмування у цілому, такі як Алонзо Чорч, Стівен Кліні, Гаскелл Каррі, Ніклаус Вірт, Алан Кей та ін. у своїй діяльності

також керувались проблемами підвищення продуктивності та забезпечення коректності отримуваних рішень [10–13]. Реінжиніринг програмного забезпечення з лавиноподібним зростанням інвестицій у його розробку став самоочевидним трендом розвитку інформаційних технологій та програмування [14]. Віддаючи належне видатним досягненням, зробленим у цьому напрямку, тим не менше, необхідно звернути увагу на те, що всі вони з об'єктивних причин слабко інтегровані між собою [15]. Адже їх адекватна інтеграція потребувала розгляду ряду питань, для вирішення яких не було достатньої фактографії. Такими, зокрема, є питання об'єктивізації суб'єктивних впливів на вирішення задач, переходу від систем, орієнтованих на замкнуті у конкретиці рішення, до систем, орієнтованих на вирішення класів подібних задач.

Що ж до другого, то спрямованість композиційного підходу на фактологічні дослідження притаманним програмуванню генетичних структур дозволяє не тільки коректно ставити, але й ефективно вирішувати задачі синтезу прикладних інформаційних та телекомунікаційних систем. На відміну від більшості традиційних підходів, що орієнтовані на синтаксичну нотацію результатів свідомого чи несвідомого застосування таких генетичних структур.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є визначення алгебраїчних характеристик класів обчислюваних функцій і предикатів над рядом іменних структур даних. Класи частково-рекурсивних функцій та предикатів над іменними носіями складають об'єкт дослідження. Предметом роботи є алгебраїчні характеристики класів частково-рекурсивних функцій та предикатів над іменними структурами даних типу кортежів та реляцій у примітивних програмних алгебрах (див. [16; 17] та бібліографію).

**Виклад основного матеріалу.** Загальні положення та необхідні позначення. Носій ППА складають  $n$ -арні функції та  $n$ -арні предикати (далі – функції та предикати) ( $n = 1, 2, \dots$ ). Сигнатуру ППА (позначаємо тут як  $\Omega$ ) складають операції суперпозиції, гілкування та циклування, як уточнення основних методів побудови програм [16; 17].

Розглянемо деяку злічену множину  $D$ , що трактується як абстрактний тип даних, і для будь-якого натурального  $k > 0$  розглянемо класи  $\Phi^k$  обчислюваних (частково-рекурсивних)  $k$ -арних функцій та предикатів вигляду  $D^k \rightarrow D$  та  $D \rightarrow \{T, F\}$  відповідно, та клас

$$\Phi \equiv \bigcup_{k=0} \Phi^k, k = 1, 2, 3$$

багатомісних частково-рекурсивних (обчислюваних) функцій та предикатів на  $D$ . Під функціями (предикатами) на  $D$ , або  $D$ -функціями ( $D$ -предикатами), будемо розуміти функції (предикати) з  $\Phi$ . Обчислюваність на  $D$  вводиться як нумераційна обчислюваність [18; 19].

Домовимося через  $A_D^{cp}$  позначати ППА, носій якої складають частково-рекурсивні функції ( $cp$ -функції) і частково-рекурсивні предикати ( $cp$ -предикати) на  $D$ , тобто  $A_D^{cp} \equiv \Phi, \Omega$ . Породжуючу множину алгебри  $A_D^{cp}$  назвемо її повною системою (ПС) і позначатимемо  $\sigma_D^{cp}$ . Повну систему ППА називатимемо її  $I_m^n$ -базисом, якщо будь-яка її підсистема, отримана видаленням з неї будь-якого предиката чи будь-якої функції, відмінної від селекторної, вже не буде повною.

Зафіксуємо  $V$  та  $W$  – непорожні злічені множини елементів, що трактуються відповідно як множини імен та значень (денотатів). У загальному випадку допускається, що деякі імена можуть виступати в ролі значень і навпаки, тобто можливо, що  $V \cap W \neq \emptyset$ . Елементи множин  $V$  та  $W$  називатимемо простими даними. Розглянемо тип даних  $D$ , породжений наступною індуктивною процедурою. Домовимось  $W \subseteq D$ . Будь-які інші елементи з  $D$  породжуються такими правилами:

- 1) якщо імена  $v_1, \dots, v_k$  з  $V$  попарно різні та  $e$   
 $d_1, \dots, d_k \in D$  то  $(v_1, d_1), \dots, (v_k, d_k) \in D, (k \geq 0)$ ;
- 2) якщо  $d_1, \dots, d_s \in D$  то  $d_1, \dots, d_s \in D, (s \geq 0)$ .

Так введений тип  $D$  називатимемо типом іменних даних [1; 2]. З огляду на те, що  $D$  залежить від параметрів  $V$  та  $W$ , в разі необхідності явного підкреслення цієї залежності для типу іменних даних використовуватимемо також позначення  $D^{(V, W)}$ , а елементи з  $D$  – називатимемо  $(V, W)$ -іменними даними.

Вже поверхневого розгляду типу іменних даних  $D$  достатньо, щоб зрозуміти, що він базується на трьох утворюючих – абстрактному типі  $W$  та породжуваних однократним застосуванням правила 1 примітивно-іменному та правилом 2 – примітивно-множинному типам даних  $PrN(V, W)$  та  $PrS^W$ , відповідно. Під примітивно-іменним даним (для стислості використовуватимемо також терміни  $(V, W)$ -іменна множина, іменна множина) розумітимемо скінченне функціональне бінарне відношення між множинами імен  $V$  та значень  $W$ . Під примітивно-множинним даним (також  $W$ -множина, множина) розумітимемо скінченну підмножину з  $W$ . Тобто,  $PrN(V, W) \subset 2^{V \times W}$  та  $PrS^W \equiv 2^W$ , де  $\equiv$  означає тотожність за визначенням, а запис  $2^A$  для деякої заданої множини  $A$  – множину всіх скінченних підмножин множини  $A$ .

Структурологічне збагачення іменних даних. Введений тип іменних даних  $D$  структурно збагачує абстрактне розуміння даних і дозволяє згідно до принципу обумовленості [1; 2], розглянути дані у контексті породжуючих їх процесів абстрагування, множення та іменування у їхньому взаємодоповненні. З цього випливає, що іменний тип даних відкритий для широкого спектру подальших прагматично обумовлених збагачень, що ґрунтуються на взаємодоповненні вищезгаданих трьох складових –  $W$ ,  $PrN(V, W)$  та  $PrS^W$ . Низка таких предметних збагачень, які базуються, як на виборі параметрів  $V$  та  $W$ , так і на обмеженнях в застосуванні правил 1 і 2, буде розглянута нижче. Усі вони реалізують вже не абстрактну точку зору на дані з  $D$ , а розглядають їх у контексті їх породжень.

За ознакою покерованості застосування правил 1 і 2 розглянемо такі збагачення:

$1^{(V, W)}$  –  $(V, W)$  – тип іменних даних, побудований лише за допомогою правила 1:

$$1^{(V, W)} \equiv \bigcup_{i=1}^{\infty} (PrN^{(V, W)})^i,$$

де

$$\begin{aligned} (PrN^{(V, W)})^1 &\equiv PrN^{(V, W)}, \\ (PrN^{(V, W)})^2 &\equiv PrN^{(V, (PrN^{(V, W)})^1)}, \dots, \\ (PrN^{(V, W)})^i &\equiv PrN^{(V, (PrN^{(V, W)})^{i-1})}, \dots; \end{aligned}$$

$PrN^{(V, D)}$  – тип іменних даних, побудова кожного з елементів якого завершується правилом 1;

$2^{(W)}$  – тип іменних даних, побудований лише за допомогою правила 2:

$$2^{(W)} \equiv \bigcup_{i=1}^{\infty} (PrS^{(W)})^i,$$

де

$$\begin{aligned} (PrS^{(W)})^1 &\equiv PrS^{(W)}, \\ (PrS^{(W)})^2 &\equiv PrS^{((PrS^{(W)})^1)}, \\ (PrS^{(W)})^i &\equiv PrS^{((PrS^{(W)})^{i-1})}, \dots; \end{aligned}$$

$PrS^{(D)}$  – тип іменних даних, побудова кожного з елементів якого завершується правилом 2;

$PrN^{(V, PrS^{(D)})}$  і  $PrN^{(V, PrS^{(W)})}$  – іменні дані типу  $(V, PrS^{(D)})$  – іменних та  $(V, PrS^{(W)})$  – іменних множин, відповідно;

$PrS^{(PrN^{(V, D)})}$  і  $PrS^{(PrN^{(V, W)})}$  – іменні дані типу  $PrN^{(V, D)}$  – множин та  $PrN^{(V, D)}$  – множин, відповідно;

Останні збагачення  $PrN^{(V, PrS^{(W)})}$ ,  $PrN^{(V, PrS^{(D)})}$ ,  $PrS^{(PrN^{(V, W)})}$ ,  $PrS^{(PrN^{(V, D)})}$  є платформою подальших прагматично обумовлених типізацій іменних даних  $D$ . Для їх здійснення буде потрібно ввести кілька додаткових визначень і для зручності викладення домовитися про кілька корисних позначень.

Під схемою іменної множини  $K$  будемо розуміти скінчену множину імен, позначувану  $Sh(K)$ , що представляє собою проекцію  $K$  за першою компонентою, тобто  $Sh(K) = pr_1(K)$ , де  $pr_i$  – функція проекції за  $i$ -ю компонентою  $m$ -арного відношення ( $1 \leq i \leq m$ ) [1; 2; 15; 16]. При цьому, іменну множину  $K$  будемо називати для скорочення  $sh(I)$  – іменною множиною або іменною множиною зі схемою  $sh(I)$  і позначати  $K^{sh(I)}$ . У розгорнутій формі будемо представляти  $\{v_1, \dots, v_n\}$  – іменні множини так:  $K^{\{v_1, \dots, v_n\}} \equiv \{(v_1, d_1), \dots, (v_n, d_n)\}$ ,  $v_i \in V, d_i \in D, i = 1 \dots n$ . Іменні множини з однаковими схемами домовимося називати односхемними іменними множинами.

Множину всіх  $(V, D)$  – іменних множин зі схемою  $\{v_1, \dots, v_n\}$  позначимо  $PrN^{(V, D)}[\{v_1, \dots, v_n\}]$ , а множину всіх примітивно-іменних даних з тією ж схемою –  $PrN^{(V, W)}[\{v_1, \dots, v_n\}]$ . При цьому, неважко переконатись, що

$$PrN^{(V, W)}[\{v_1, \dots, v_n\}] \subset PrN^{(V, D)}[\{v_1, \dots, v_n\}].$$

Маючи на увазі, що  $K^\emptyset = \emptyset$  та  $PrN^{(V, D)}[\emptyset] = \emptyset$ , отримаємо

$$PrN^{(V, D)} = \bigcup_{V' \in 2^V} PrN^{(V, D)}[V']$$

і зокрема,

$$PrN^{(V, W)} = \bigcup_{V' \in 2^V} PrN^{(V, W)}[V'].$$

Множини всіх  $PrN^{(V, D)}[\{v_1, \dots, v_n\}]$  – множин та  $PrN^{(V, W)}[\{v_1, \dots, v_n\}]$  – множин позначимо  $PrS^{(D)}[\{v_1, \dots, v_n\}]$  і  $PrS^{(W)}[\{v_1, \dots, v_n\}]$ . Зрозуміло, що

$$PrS^{(D)}[\{v_1, \dots, v_n\}] = 2^{PrN^{(V, D)}[\{v_1, \dots, v_n\}]},$$

а також

$$PrS^{(W)}[\{v_1, \dots, v_n\}] = 2^{PrN^{(V, W)}[\{v_1, \dots, v_n\}]}$$

Звідси, за аналогією з попереднім,

$$PrS^{(W)}[\{v_1, \dots, v_n\}] \subset PrS^{(D)}[\{v_1, \dots, v_n\}]$$

$$PrS^{(D)} = \bigcup_{V' \in 2^V} PrS^{(D)}[V'],$$

та

$$PrS^{(W)} = \bigcup_{V' \in 2^V} PrS^{(W)}[V']$$

Важливою особливістю типу  $PrS^{(D)}[\{v_1, \dots, v_n\}]$  і зокрема,  $PrS^{(W)}[\{v_1, \dots, v_n\}]$ , є те, що їхніми елементами є множини односхемних  $D$ - та  $W$ -іменних множин. У зв'язку з цим,  $PrS^{(D)}[\{v_1, \dots, v_n\}]$  та  $PrS^{(W)}[\{v_1, \dots, v_n\}]$  можуть бути базою для експлікації значимих для комп'ютерної науки яких завгодно складно організованих структурних типів даних, таких як таблиця, реляція, масив, список, черга і т. п. Усі вони є видами згаданих вище родових типів, які ми називатимемо, відповідно до традицій,  $\{v_1, \dots, v_n\}$ -арними  $D$ - та  $W$ -множинами, або, якщо немає необхідності вказувати явно схему іменних множин їх складових – поліарними  $D$ - та  $W$ -множинами. Самі ж типи  $PrS^{(D)}[\{v_1, \dots, v_n\}]$  і  $PrS^{(W)}[\{v_1, \dots, v_n\}]$  –  $D$ - і  $W$ -поліарними типами даних або просто поліарними типами даних, якщо це не призведе до непорозумінь. Експлікація значущих для програмування структурних типів даних може бути проведена за допомогою подальшої типізації поліарних типів даних.

Проте ці типізації матимуть вже не структурологічний, а предметний характер, пов'язаний з конкретизаціями множин  $V$  та  $W$ . Крім того, новостворені структурні типи даних слід збагатити притаманними їм функціональними структурами.

*Предметна конкретизація поліарних типів даних.* Як перший крок предметної конкретизації зафіксуємо  $V = W = N$ . Відзначимо, що через зліченність множин  $V$  та  $W$  такий перехід, з одного боку, принципово не обмежить загальність розглядів, а з іншого боку, суттєво спростить викладення отриманих результатів. При цьому, дана конкретизація суттєво збагачує розгляди, підтримуючи виділення нових, прагматично обумовлених типів даних. Деякі з них є збагаченнями «по формі» і зводяться до результатів простого перепозначення імен і денотатів. Збагачення «по суті», зі свого боку, зводяться до врахування послідовнісної специфіки структур даних, характерних для сучасного програмування. До перших відносяться типи:  $PrN^{(N, D^{(N, N)})}[\{v_1, \dots, v_n\}]$ ,  $PrN^{(N, N)}[\{v_1, \dots, v_n\}]$ ,  $PrS^{(D^{(N, N)})}[\{v_1, \dots, v_n\}]$  та  $PrS^{(N, N)}[\{v_1, \dots, v_n\}] \in 2^N$ . Другі є їх суттєвими конкретизаціями «за наборами імен» – результатами переходу від довільної схеми іменування  $\{v_1, \dots, v_n\}$  до стандартної, що ґрунтується на «щільній» послідовній схемі –  $\{1, \dots, n\}_{n \in N}$ :  $PrN^{(N, D^{(N, N)})}[\{1, 2, \dots, n\}]$ ,  $PrN^{(N, N)}[\{1, 2, \dots, n\}]$ ,  $PrS^{(D^{(N, N)})}[\{1, 2, \dots, n\}]$  та  $PrS^{(N)}[\{1, 2, \dots, n\}]$

Так наприклад,  $PrN^{(N, N)}[\{1, 2, \dots, n\}]$ , представляє собою іменну експлікацію широко використовуюваного у програмуванні кортежного типу: наприклад, експлікацією кортежу  $\langle 3, 5, 7 \rangle$  є іменна множина:

$$\{(1, 3), (2, 5), (3, 7)\} \in PrN^{(N, N)}[\{1, 2, 3\}].$$

При цьому дана експлікація не просто відображає кортежну специфіку експлікованої сутності, але надає концептуально єдине розуміння його трактування її в більшості мов програмування.

$PrS^{(N)}[\{1, 2, \dots, n\}]$  експлікує тип скінченних  $n$ -арних відношень, які складають основу широко використовуюваного у комп'ютерній науці реляційного типу:

|   |   |   |
|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 |
| 5 | 8 | 4 |
| 2 | 7 | 2 |

$$\Leftrightarrow \{ \{(1, 5), (2, 8), (3, 4)\}, \{(1, 2), (2, 7), (3, 2)\} \} \in PrS^{(N, N)}[\{1, 2, 3\}]$$

Іменні експлікації структур даних можна продовжити за необхідності. Важливо відзначити, що всі вони базуватимуться на концептуально єдиній основі – іменному даному. Тепер розглянемо алгебраїчні характеристики класів обчислюваних функцій над окремими репрезентативними носіями, в рамках відповідних примітивних програмних алгебр (ППА).

Алгебраїчні характеристики класів частково-рекурсивних функцій та предикатів над іменними даними

З зазначеного випливає можливість використання іменної моделі даних як концептуально єдиної платформи експлікації структурних типів даних. Тут розглянемо алгебраїчні характеристики класів обчислюваних функцій над кортежами та реляціями. У якості платформи розгляду оберемо примітивні програмні алгебри (ППА). У якості методу використаємо метод ізоморфних специфікацій [2; 16].

Нехай  $K \equiv \bigcup_{i \in N} PrN^{(N, N)}[\{1, 2, \dots, i\}]$  – кортежний, а  $R \equiv \bigcup_{i \in N} PrR^{(N, N)}[\{1, 2, \dots, i\}]$  – реляційний носії даних, відповідно, де  $PrN^{(N, N)}[0] \equiv \rangle$  – т. з. «пустий» кортеж, що не містить елементів, а  $PrS^{(N)}[0] \equiv \Delta$  – «пуста» реляція» як пуста множина кортежів. Домовимось малими літерами латинського алфавіту  $k, l, m$ , можливо із індексами, якщо не оговорене або з контексту їх використання не слідує інше, будемо позначати елементи множини  $K$ , літерами  $q, r, s, t$ , можливо з індексами – елементи множини  $R$ .

Зазначимо, що з ефективної зліченості множин  $K$  та  $R$  безпосередньо впливає їх ефективна впорядкованість. Звернемося до ППА  $A_K^{cp} = \Phi_K$ , частково-рекурсивних функцій ( $cp$ -функцій) та частково-рекурсивних предикатів ( $cp$ -предикатів), як платформи уточнень кортежних маніпуляцій.

Відомо, що набір

$$\sigma_K \equiv \left\{ \Phi, S, C_0, \circ, =_K, I_m^n \Big|_{(m,n \in N, m \leq n)} \right\}$$

представляє собою  $I_m^n$ -базис алгебри  $A_K^{cp}$  [8]. Тут  $\Phi, S, C_0$  – унарні,  $\circ$  – бінарна,  $I_m^n$  –  $n$ -арні ( $n, m \in N$ )  $cp$ -функції та  $=_K$  – бінарний  $cp$ -предикат такі, що:

$$\begin{aligned} \Pi : \Pi \left( \left\{ (1, a_1), (2, a_2), \dots, (s, a_s) \right\} \right) &\equiv \\ &\equiv \left\{ (1, a_2), (2, a_3), \dots, (s, a_{s-1}) \right\} \Big|_{s, a_i \in N, i=1, \overline{s}} \end{aligned}$$

– видалення першого елемента кортежу;

$$\begin{aligned} S : S \left( \left\{ (1, a_1), (2, a_2), \dots, (s, a_s) \right\} \right) &\equiv \\ &\equiv \left\{ (1, a_1 + 1), (2, a_2), \dots, (s, a_s) \right\} \Big|_{s, a_i \in N, i=1, \overline{s}} \end{aligned}$$

– збільшення першого елемента кортежу на одиницю;

$$C_0 : C_0 \left( \left\{ (1, a_1), (2, a_2), \dots, (s, a_s) \right\} \right) \equiv \left\{ (1, 0) \right\} \Big|_{s, a_i \in N, i=1, \overline{s}}$$

– встановлення константи  $\left\{ (1, 0) \right\}$ ;

$$\circ : \circ \left( \left\{ (1, a_1), (2, a_2), \dots, (s, a_s) \right\} \Big|_{s, a_i \in N, i=1, \overline{s}}, \left\{ (1, b_1), (2, b_2), \dots, (k, b_k) \right\} \Big|_{k, b_j \in N, j=1, \overline{k}} \right) \equiv$$

$$\equiv \left\{ (1, a_1), \dots, (s, a_s), (s+1, b_1), \dots, (s+k, b_k) \right\} \Big|_{s, a_i, k, b_j \in N, i=1, \overline{s}, j=1, \overline{k}}$$

– конкатенація двох кортежів;

$$I_m^n : I_m^n (A_1, \dots, A_n) = A_m \Big|_{m, n \in N, m \leq n},$$

де

$$A_i = \left\{ (1, a_i^1), \dots, (p_i, a_{p_i}^i) \right\} \Big|_{i=1, \overline{n}, p_i \in N}$$

– селекторна функція [8; 14];

$$\begin{aligned} =_k : =_k \left( \left\{ (1, a_1), \dots, (s, a_s) \right\} \Big|_{s, a_i \in N, i=1, \overline{s}}, \left\{ (1, b_1), \dots, (k, b_k) \right\} \Big|_{k, b_i \in N, i=1, \overline{k}} \right) &= \\ = \begin{cases} T, \text{ якщо } (s=k) \wedge (i=j) \rightarrow (a_i = b_j) \\ F, \text{ інакше} \end{cases} \end{aligned}$$

– предикат рівності кортежів.

Спираючись на результат про  $I_m^n$ -базис алгебри  $A_K^{cp}$  та на ефективну зліченість множин  $K$  та  $R$ , співставляючи кожній  $cp$ -функції на  $R$   $cp$ -функцію на  $K$ , яка представляє її у відображенні:

$$\begin{aligned} H : K \rightarrow R : H(\Lambda) = \Delta, H \left( \left\{ (1, a_1), \dots, (m, a_m) \right\} \Big|_{m, a_i \in N, i=1, \overline{m}} \right) &\equiv \\ &\equiv \left\{ \left\{ (1, a_1), \dots, (m, a_m) \right\} \right\} \Big|_{m, a_i \in N, i=1, \overline{m}} \end{aligned}$$

та діючи аналогічно для  $cp$ -предикатів, будемо бієкцію  $\theta_H : R \rightarrow K$ -ізоморфізм алгебри  $A_R^{cp}$  на алгебру  $A_K^{cp}$ . Для цього, визначимо кодуєче та декодуєче відображення  $\phi : R \rightarrow K$  та  $\vartheta : K \rightarrow R$  і змоделюємо їх у вигляді реляційних  $cp$ -функцій  $\psi : R \rightarrow H(K)$  та  $\chi : H(K) \rightarrow R$ , де  $H(K) \subset R$  – образ множини  $K$  у відображенні  $H$ . Зауважимо, що зліченість множин  $K$  та  $R$  обумовлює впорядкованість будь-якої реляції як множини кортежів. Будемо вважати, що кортежі впорядковані у відповідності з їх номерами у деякій зафіксованій ефективній нумерації множини  $K$ . Тоді кодуєче та декодуєче відображення  $\phi$  та  $\vartheta$  можуть бути задані так:

$$\phi(\Delta) = \Lambda,$$

$$\begin{aligned} \phi \left( \left\{ \left\{ (1, a_1^i), \dots, (j, a_j^i), \dots, (k, a_k^i) \right\} \right\} \Big|_{i=1, \overline{n}, j=1, \overline{k}, a_j^i, k, n \in N} \right) &= \\ = \left\{ (1, k) \right\} \circ \left\{ (2, a_1^i), \dots, (k+1, a_k^i) \right\} \circ \dots & \\ \dots \circ \left\{ (s \cdot k + 2, a_1^{i \cdot k}), \dots, ((s+1) \cdot k, a_k^{i \cdot k}) \right\} \circ & \\ \circ \left\{ ((s+1) \cdot k + 1, a_1^{i \cdot k + 1}), \dots, (n \cdot k, a_k^{i \cdot k}) \right\} \Big|_{s=1, \overline{n}} & \end{aligned}$$

та

$$\vartheta(\Lambda) = \Delta,$$

$$\begin{aligned} \vartheta \left( \left\{ (1, k), (2, a_1), \dots, (s \cdot k, a_{s \cdot k}) \right\} \Big|_{k, s, a_i \in N, i=1, \overline{s \cdot k}} \right) &= \\ = \left\{ \left\{ (1, a_1), \dots, (k, a_k) \right\}, \left\{ (1, a_{k+1}), \dots, (k, a_{2 \cdot k}) \right\}, \dots \right\} & \\ \dots, \left\{ (1, a_{(s-1) \cdot k}), \dots, (k, a_{s \cdot k}) \right\} \right\} & \end{aligned}$$

Використавши, з метою моделювання кортежних функцій реляційними, введено вище відображення  $H$  отримуємо  $\psi = \phi \cdot H$ . Тут  $\phi \cdot H$  розуміється як традиційне множення функцій, тобто  $\phi \cdot H : R \rightarrow R$  така, що  $\phi \cdot H(Q) = H(\psi(Q)) \Big|_{Q \in R}$ . Відповідно, функцію  $\chi : R \rightarrow R$  можна представити як деяке розширення функції  $\psi^{-1}$  на всю множину  $R$ . Очевидно, що так уведені функції  $\psi$  та  $\chi$  є реляційними  $cp$ -функціями, що представляють у відображенні  $H$  кодуєче та декодуєче відображення  $\phi$  та  $\vartheta$ .

Розглянемо наступні реляційні  $cp$ -функції та  $cp$ -предикати:

$$\begin{aligned} \Pi_R : \Pi_R \left( \left\{ \left\{ (1, a_1^1), (2, a_2^1), \dots, (s, a_s^1) \right\}, \dots \right\} \Big|_{k, s, a_i \in N} \right) &\equiv \\ &\equiv \left\{ (1, a_2^1), \dots, (s-1, a_{s-1}^1), \dots \right\} \\ &\equiv \left\{ \left\{ (1, a_2^k), \dots, (s-1, a_{s-1}^k) \right\} \right\} \Big|_{k, s, a_i \in N} \end{aligned}$$

– видалення першого «стовпчика» реляції;

$$S_R : S_R \left( \left\{ \left\{ (1, a_1^1), (2, a_2^1), \dots, (s, a_s^1) \right\}, \dots \right\} \Big|_{k, s, a_i \in N} \right) \equiv \left\{ \left\{ (1, a_1^1 + 1), (2, a_2^1), \dots, (s, a_s^1) \right\}, \dots \right\} \Big|_{k, s, a_i \in N}$$

– збільшення першого «стовпчика» реляції на 1;

$$C_R : C_R \left( \left\{ \left\{ (1, a_1^1), (2, a_2^1), \dots, (s, a_s^1) \right\}, \dots \right\} \Big|_{k, s, a_i \in N} \right) \equiv \left\{ \left\{ (1, 0) \right\} \right\}$$

– встановлення константи  $\left\{ \left\{ (1, 0) \right\} \right\}$ ;

$$\circ_R : \circ_R \left( \left\{ A^1, \dots, A^k \right\}, \left\{ B^1, \dots, B^s \right\} \right) \Big|_{\substack{k, s, m, n \in N, A^i \equiv \{(1, a_1^i), (2, a_2^i), \dots, (n, a_n^i)\}, \\ B^j \equiv \{(1, b_1^j), (2, b_2^j), \dots, (m, b_m^j)\}}} \equiv \left\{ \left( A^p, B^q \right) \Big|_{p=1, \dots, k, q=1, \dots, s} \right\}$$

– розширений декартовий добуток двох реляцій;

$$I_m^n : I_m^n (R_1, \dots, R_n) = R_m \Big|_{m, n \in N, m \leq n}$$

де  $R_i \in R$ ;

– вибір реляції  $R_m$ ;

$$=_{R:} =_{R} (R_1, R_2) = \begin{cases} T, & \text{якщо } R_1 = R_2 \\ F, & \text{інакше} \end{cases}$$

– предикат рівності реляцій.

Безпосередньо з наведеного виливає, що реляційні функції  $\Pi_R, S_R, C_{\{0\}}, \circ_R$  та реляційний предикат  $=_R$  є реляційними моделями відповідних кортежних функцій  $\Pi, S, C_0, \circ$  та кортежного предикату  $=_K$  [15; 16]. Адже легко пересвідчитись, що:

$$\begin{aligned} \Pi_R(k) \Big|_{k \in K} &\equiv \Pi \cdot H(k), \\ H \cdot S_R(k) \Big|_{k \in K} &\equiv S \cdot H(k), \\ H \cdot C_{\{0\}}(k) \Big|_{k \in K} &\equiv C_0 \cdot H(k), \\ H \cdot \circ_R(k_1, k_2) \Big|_{k_1, k_2 \in K} &\equiv \circ \cdot H(k), \\ H \cdot =_R(k_1, k_2) \Big|_{k_1, k_2 \in K} &\equiv =_K \cdot H(k) \end{aligned}$$

Звідси безпосередньо випливає справедливості наступного твердження.

*Теорема*

$$\sigma_R = \left\{ \Pi_R, S_R, C_{\{0\}}, \circ_R, \Psi, \chi, =_R, I_m^n \right\} \Big|_{m, n \in N; m \leq n} - I_m^n \text{-базис алгебри ППА } A_K^{\text{PP}}.$$

Дане твердження представляє алгебраїчну характеристику класу частково-рекурсивних функцій та частково-рекурсивних предикатів над реляціями як платформу семантико-синтаксичних специфікацій класу реляційних перетворень.

**Висновки.** Відомо, що рішення будь-якої задачі суть інтеграція рішень її підзадач. Для відносно простих задач інтеграційний аспект частіше за все не є визначальним і їм можна знехтувати. При вирішенні ж реальних задач інтеграційний аспект відіграє ключову роль. Така особливість є характерною для задач побудови прикладних інформаційно-телекомунікаційних систем. Тому дослідження загально значимих інтеграційних структур для вирішення реальних задач, в області прикладних телекомунікацій, набувають сьогодні першорядного значення. Особливістю таких задач сьогодні є залучення до їх вирішення великих масивів складно організованої інформації. Строга специфікація складних інформаційних структур має першорядне значення як власне для визначення використовуваних структурованих типів даних, так і для дослідження різного роду маніпуляцій над ними.

У статті на базі поняття іменної множини розглянуто метод іменних специфікацій складно структурованих даних. Запропоновано іменні специфікації даних типу кортежу та реляції (скінченного відношення). Представлено та обґрунтовано метод ізоморфних специфікацій знаходження породжуючих сукупностей у примітивних програмних алгебрах обчислюваних функцій та предикатів над зліченими носіями. Вирішено проблему повноти для класу реляційних *чр*-функцій та *чр*-предикатів. Показано, що сигнатурні операції ППА складають повну систему операцій, що уточнюють поширені методи побудови прикладних телекомунікаційних систем. Отримані результати розвивають напрямок прикладних телекомунікаційних систем програмування, що досліджує електронні комунікації, перед усім, як інструмент, що підтримує вирішення реальних прикладних задач.



Список літератури:

1. Redko V. Foundations of programmology. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2000. № 36. P. 27–42. DOI:10.1007/BF02733300.
2. Редько І.В., Редько Д.І., Захарченко Т. Л. Концептологічні основи проектування. Київ : Компринт. 2016.
3. Редько І.В., Яганов П.О., Зилевич М.О., Редукційне концептування оракульних схем. *Системні дослідження та інформаційні технології*, 2021. № 1. С. 21–33, DOI: 10.20535/SRIT.2308-8893.2021.1.02
4. Редько І.В., Яганов П.О., Концептуальна модель технологічного середовища програмування. *Наукові вісті КІІ*. 2020. № 1. С. 18–26. DOI: 10.20535/kpi-sn.2020.1.197953.
5. Vacus, J.W. The algebra of functional programs: Function level reasoning, linear equations, and extended definitions. In *Lecture Notes in Computer Science*, № 107. *Formalization of Programming Concepts*. Springer-Verlag, New York, 1981, С. 1–43.
6. Curry H.D., Hindley R., Seldin J.P. *Combinatory Logic. Studies in Logic*. Amsterdam: North-Holland Co. 1972.
7. Dahl O.-J., Dijkstra E.W., Hoare C.A.R. *Structured Programming*. London: Academic Press., 1972. ISBN 0-12-200550-3.
8. McCarthy J. Recursive Functions of Symbolic Expressions and Their Computation by Machine, *Communications of the ACM*. 1960. № 3. P. 184–195.
9. ACM Turing Award Lectures: The First Twenty Years: 1966 to 1985. Assn for Computing Machinery. 1987.
10. Church A. *Introduction to Mathematical Logic*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1956/
11. Dijkstra E.W. *A Discipline of Programming*. Prentice-Hall. 1976.
12. Wirth N. *Algorithms and Data Structures*. Oberon. 2004.
13. Brooks, F.P.Jr. *Design of Design, The: Essays from a Computer Scientist*. New York: Addison-Wesley. 2010.
14. Comella-Dorda S., Wallnau K., Seacord R., Robert J. A Survey of Legacy System Modernization Approaches. Pittsburgh: Software Engineering Institute. 2000.
15. Redko D.I., Redko I.V., Yahanov P. O., Zakharchenko T.L. Compositional basis in programmer activity. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2015. № 4. P. 83–96.
16. Захарченко Т.Л., Редько І.В., Д. І. Редько, Яганов П.О. Примітивна програмна алгебра обчислюваних функцій над записами. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2015. № 2. С. 29–40.
17. Захарченко Т.Л., Редько І.В. Проблема повноти в класі функцій над записами, які зберігають денотати. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2015. № 5. С. 23–30.
18. Cutland N. *Computability. An introduction to recursive function theory*. Cambridge university press. 1980.
19. Goncharov S. Computable single-valued numerations. Springer. *Translated from Algebra i Logika*. V. 19. № 5. 1980. P. 507–551. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01669607>

**Redko I.V., Sushchenko V.S. COMPLETENESS ISSUES IN THE CLASSES OF COMPUTABLE FUNCTIONS AND PREDICATES OVER NAMED DATA STRUCTURES**

*The article examines the algebraic properties of classes of computable functions and predicates over named data structures. Many studies justify their role as a universal means of specifying pragmatically important data structures for programming. The main focus is on the compositional programming paradigm as a methodological basis for considering methods of program construction. Primitive program algebras (PPA) of partial-recursive functions and partial-recursive predicates over named data represent the object of research. The selection of these data structures is determined by their importance and popularity in both theoretical and applied programming. In particular, tuple and relational data structures play a crucial role in research related to the completeness of query languages in databases. The definitions of PPA are provided in the works of V.N. Redka, D.B. Buia, I.V. Redka, and other authors. The PPA signature consists of superposition, branching, and looping operations, which refine the well-known control structures of most programming languages and can be applied in telecommunication software-hardware system development. Significant attention is given to the challenges of constructing PPA characteristics for classes of considered computable functions and predicates, which are the article's subject.*

*The computability of functions (predicates) over effectively enumerable domains is introduced as numeral computability, in the sense of works by N. Cutland in “Computability: An Introduction to Recursive Function Theory,” A. Ershov in “Computability in Arbitrary Domains and Bases,” and Y. Ershov in “The Theory of Numerations.” The present study is dedicated to applying the algebraic approach, particularly the method of isomorphic specifications in research and software development. Along with general results regarding named data and functions, the paper describes classes of tuple and relational computable functions and predicates. Corresponding basic sets of functions and predicates in PPAs are defined.*

**Key words:** algebraic characteristic, compositional paradigm, computable function, computable predicate, tuple, relation, program algebra, isomorphism, Imm-basis.

**Ронський С.І.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

## ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ СТАТУС КОДІВ RFC 9110 У КОНТЕКСТІ ВАЛІДАЦІЇ НТТР ЗАПИТУ

*Сучасний світ важко уявити без веб застосунків. Однією з ключових задач при розробці архітектури для таких застосунків є валідація вхідних даних та коректних стандартизованих НТТР відповідей. І хоча протокол НТТР існує на протязі більше як двох десятиліть, досі виникають спірні питання при розробці веб додатків у контексті статус коду відповіді.*

*Дана стаття розглядає використання НТТР статус кодів. Зокрема досліджені певні спірні прикладах використання, та як ці питання вирішили в крайньому стандарті RFC 9110. На початку, стаття розглядає хронологію змін в стандартах семантики НТТР, базове використання статус кодів. Більш детально розглядаються коди які в різних випадках використовуються як коди помилок валідації НТТР запиту, а саме 400 (Bad Request), 401 (Unauthorized), 403 (Forbidden), 404 (Not Found) та 409 (Conflict). Окремо розглядається використання коду 422 (Unprocessable Entity) який введений в крайньому стандарті, та потенційно вирішує суперечливі питання.*

*Для опису проблемних питань розглядається приклад коду контролера веб-додатку на платформі Node.js з використанням фреймворку NestJS. В статті описані потенційні обробники виключень пов'язаних з валідацією вхідних даних та валідацією бізнес правил. Стаття включає аналіз обговорень спірних питань формування НТТР відповідей у розробницькій спільноті та порівняння різних підходів до використання НТТР статусів. Перше спірне питання яке розглядається – це формування відповіді у випадку відсутності пов'язаної сутності у POST та PUT запитах. Тобто випадок, у якому клієнт вказує ідентифікатор сутності у тілі запиту, але дана сутність відсутня в системі. Друге питання що розглядається, формування відповіді у випадку виключення пов'язаним з правилами бізнес валідації. У статті вказано на переваги та недоліки різних підходів і надано рекомендації до використання стандарту RFC 9110, зокрема коду статусу 422.*

**Ключові слова:** *hypertext transfer protocol, веб-застосунок, валідація, архітектура, статус код.*

**Постановка проблеми.** При розробці веб-додатків однією з ключових задач є обробка НТТР запитів та правильна валідація вхідних даних. Незважаючи на наявність різноманітних інструментів та бібліотек, іноді розробники стикаються з викликом неоднозначності кодів статусу при валідації даних та управлінні бізнес-правилами веб-застосунків.

В мережі інтернет існують обговорення певних питань коректності повернення кодів 400, 404 та 409 для різних випадків. Документ RFC 9110 стандартизує статус коду 422. Цей статус код вирішує певні спірні питання, такі як валідація бізнес-правил та обробка відсутності пов'язаної сутності, але виникає питання про його практичне використання у веб-додатках, зокрема на платформі Node.js.

У цій публікації ми розглянемо спірні питання використання статус кодів валідації та практичне застосування статусу кодів згідно з RFC 9110 у контексті валідації НТТР запитів в Node.js додатках. Ми звернемо особливу увагу на новий код статусу 422 та його роль у розв'язанні вищезаз-

начених проблем валідації та управління даними в веб-додатках.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Теоретичні аспекти НТТР протоколу закладені Тімом Бернерсом-Лі ще у 1989 році. Але протокол та стандарти оновлюються різними групами інженерів, зокрема над стандартом який ми розглядаємо в даній статті працювали R. Fielding, M. Nottingham та J. Reschke. Стандарти лягають в основу як веб розробки в цілому, так і архітектури веб додатків. Серед вітчизняних науковців питання розробки веб додатків є доволі популярним, наприклад роботи на дану тематику пишуть наступні науковці: Пономарьов Ігор Володимирович, Поперешняк Світлана Володимирівна.

**Постановка завдання.** Метою статті є демонстрація можливостей практичного використання кодів зі стандарту RFC 9110, а саме питання використання кодів що пов'язані з помилками валідації НТТР запитів.

**Виклад основного матеріалу.** НТТР (Hypertext Transfer Protocol) є основним протоколом для обміну даними в Інтернеті, що використовується

для передачі гіпертекстових документів, зображень, відео та іншого вмісту між веб-серверами та клієнтськими програмами. Розроблений у 1989 році [1] і вдосконалений з часом, HTTP є основним механізмом комунікації в мережі Інтернет, забезпечуючи швидкий та ефективний обмін інформацією між веб-ресурсами.

Для розуміння сучасного стану HTTP протоколу і його розвитку важливо розглянути ключові стандарти та специфікації, що змінювалися з часом. В червні 2022 року Інтернет інженерна група (IETF) опублікувала новий стандарт RFC 9110, який замінює застарівші 2818, 7230, 7231, 7232, 7233, 7235, 7538, 7615, 7694 [2]. Дані стандарти визначають HTTP статус код як частину відповіді на HTTP запит. Він використовується для передачі інформації про результат виконання запиту між клієнтом і сервером. Кожен HTTP статус код вказує на певний стан або результат запиту. Ці статуси можуть вказувати на успішне виконання запиту (наприклад, статус 200 “OK”), перенаправлення (наприклад, статус 301 “Moved Permanently”), помилки клієнта (наприклад, статус 404 “Not Found”) або помилки сервера (наприклад, статус 500 “Internal Server Error”).

Загалом, статус коди HTTP поділяються на п’ять основних груп, кожна з яких вказує на певний аспект результату виконання запиту. Перша група, яку представляють статуси від 1xx до 1xx, використовується для інформаційних повідомлень, які підтверджують, що запит був отриманий і оброблений. Друга група статусів, від 2xx до 2xx, позначає успішне завершення запиту, коли сервер успішно зрозумів і виконав запит клієнта. Третя група, від 3xx до 3xx, вказує на те, що для завершення запиту клієнт повинен виконати додаткові дії, такі як перенаправлення. Четверта група, від 4xx до 4xx, вказує на помилки, які виникли через неправильні або некоректні запити з боку клієнта. Нарешті, п’ята група, від 5xx до 5xx, вказує на помилки, які виникли на стороні сервера під час обробки запиту, такі як внутрішня помилка сервера чи перевантаження [3]. Ці групи статусів допомагають розробникам та адміністраторам розуміти характер проблеми та вживати відповідні заходи для її вирішення.

В контексті даної статті нас цікавлять наступні статуси коди:

- 400 – Bad Request: Цей код статусу вказує на те, що сервер не може обробити запит через помилку у синтаксисі запиту, що зробив клієнт.
- 401 – Unauthorized: Цей код статусу означає, що клієнт не авторизований для доступу до

ресурсу. Це може стати результатом недостатньої авторизації або відсутності валідних облікових даних.

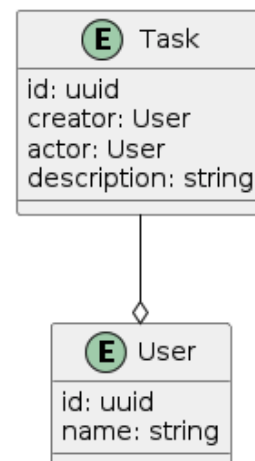
- 403 – Forbidden: Сервер повідомляє клієнта, що доступ до запитаного ресурсу заборонений. Це може бути через недостатні права доступу або обмеження, встановлені на сервері.

- 404 – Not Found: Цей код статусу означає, що запитаний ресурс не знайдений на сервері. Це може бути через невірну URL адресу або через відсутність ресурсу на сервері.

- 409 – Conflict: Цей код статусу вказує на конфлікт у виконанні запиту, який може виникнути, наприклад, при спробі створити ресурс, який вже існує.

- 422 – Unprocessable Entity: Цей код статусу означає, що сервер не може обробити запит через неправильний формат або невірні дані у вмісті запиту, незважаючи на те, що сам запит був коректним.

Опишемо гіпотетичний приклад додатку на мові TypeScript з використанням фреймворку NestJS [4]. Нехай в нашій системі існують сутності користувач (User) та задача (Task). ідентифікацію сутностей виконується за допомогою UUID (Universally Unique Identifier) [5], кожна задача має 2 посилання на сутність користувача: створювач (creator) та виконавець (actor). UML схема зображена на рис. 1.



Поле creator заповнюється у відповідності до поточного користувача. Поле actor заповнюється користувачем. Відповідно у нашій системі мають існувати REST ресурс [6] `/api/tasks`. Розглянемо приклад коду для кінцевих точок (endpoint) `POST /api/tasks` – для створення сутності завдання та `PUT /api/tasks/{uuid}` – для редагування сутності завдання. Розглянемо частину потенційного спрощеного лістингу коду контроллера:

```
@Controller('api/tasks')
@UseGuards(JwtAuthGuard)
export class Tasks {
  constructor(
    private readonly taskGateway: ITaskGateway,
    private readonly userGateway: IUserGateway,
    private readonly canBeUpdatedSpec: CanBeUpdatedSpecification,
    private readonly validDataSpec: ValidDataSpecification,
  ) {}

  // ...
  @Post()
  public async create(
    @Body() data: TaskRequest,
    @CurrentUser() userRetriever,
  ): Promise<TaskResponse> {
    const entity = data.toEntity(new Task());
    entity.creator = await userRetriever();
    entity.actor = await this.getUserOrFail(data.actorId);
    await this.validDataSpec.isSatisfiedOrFail(entity);
    const task = await this.taskGateway.create(entity);

    return TaskResponse.fromEntity(task);
  }

  @Put('/:id')
  public async update(
    @Param('id') id: string,
    @Body() data: TaskRequest,
  ): Promise<Action> {
    const dbTask = await this.getTaskOrFail(id);
    await this.canBeUpdatedSpec.isSatisfiedOrFail(dbTask);
    const entity = data.toEntity(dbTask);
    if (dbTask.actor.id !== data.actorId) {
      entity.actor = await this.getUserOrFail(data.actorId);
    }
    await this.validDataSpec.isSatisfiedOrFail(entity);
    await this.gateway.update(entity);

    return TaskResponse.fromEntity(task);
  }

  private async getTaskOrFail(id: string): Promise<Action> {
    const entity = await this.taskGateway.getOneById(id);
    if (!entity) throw new NotFoundException();
    return entity;
  }

  private async getUserOrFail(id: string): Promise<Action> {
    const entity = await this.userGateway.getOneById(id);
    if (!entity) throw new LinkedEntityNotFoundException();
    return entity;
  }
}
```

Додатково розглянемо використані класи:

- *UseGuards, JwtAuthGuard* – декоратор що відповідає за аутентифікацію контролера та відповідна стратегія аутентифікації.

- *ITaskGateway, IUserGateway* – абстрактні шлюзи, які відповідають за збереження даних у системі.

- *CurrentUser* – декоратор отримання поточного користувача.

- *TaskResponse, TaskRequest* – DTO, що репрезентують дані запиту та відповіді для веб запиту.

- *CanBeUpdatedSpecification, ValidDataSpecification* – сервіси створені за паттерном специфікація [7].

Наш код на рівні додатку має повертати виключення у наступних випадках:

- Користувач не автентифікований – 401 статус.
- Неправильно сформовані дані запиту – 400 статус.

- Відсутнє завдання у базі даних – 404 статус.

Більшість випадків на сьогоднішній день покриті стандартами та рекомендаціями доволі однозначно. Розглянемо випадки у яких виникають неоднозначності, та як стандарт RFC 9110 вирішує їх вирішує.

Відсутній користувач з ідентифікатором при присвоєнні виконавця. В нашому лістингу, код поверне 404 статус. Зазначимо, що дане питання обговорюється протягом довгого часу у професійній спільноті розробників програмного забезпечення. Ми можемо знайти наступні обговорення даного та споріднених питань на популярному ресурсі для розробників Stack Overflow:

- “StackOverflow: 400 vs 422 response to POST that references an unknown entity” [8];

- “Should POST request return 404 if reference to other entity fails?” [9];

- “StackOverflow: 400 vs 422 response to POST of data” [10];

- “StackOverflow: RFC – 404 or 400 for relation of entity not found in PUT request” [11];

- “StackOverflow: RestApi: 404, 422 or 500?” [12].

Звертаємо увагу, що для більшості обговорені і відповіді актуальним RFC є 7231. Дехто з відповідачів посилається на більш старий стандарт RFC 2616. Розглянемо основні варіанти відповідей:

- 404. Частина розробників використовує 404 (Not Found) статус. Тим не менше стандарт говорить про використання даного статусу у випадках коли не знайдено цільовий ресурс. В нашому випадку це ендпойнт на створення чи редагування

завдання, тому використання даного статусу не відповідає стандарту.

- 400. Популярним варіантом серед запитувачів також є 400 (Bad Request) статус. Даний статус використовується для невірних сформованих запитів. У нашому випадку, цей статус у контексті поля запиту actorId ми могли б використати якщо поле відсутнє, або не відповідає формату uuid.

- 409. Непопулярним та все ж непоганим кандидатом є 409 (Conflict). Але знову ж, стандарт говорить про неможливість завершити запит через наявність конфлікту стану цільового ресурсу. Тобто такий статус краще використовувати для валідації бізнес правил.

- 422. Саме даний варіант набрав найбільшу кількість голосів у найпопулярнішому обговоренні. Даний код говорить про те, що сервер розуміє суть запиту, але не може виконати поточних інструкцій. Тим не менше на момент даного обговорення статус 422 (Unprocessable Entity) був відсутній в стандарті HTTP, та був описаний в розширенні для WebDAV (RFC 4918) [13]. Саме цим фактом контраргументують інші користувачі. Також автор даної відповіді вказує на даний факт і рекомендує використовувати код 400, який є в RFC 7231 [14] у випадку, якщо використання 422 не виглядає прийнятним.

Таким чином ми можемо бачити, що довгий час існувала неоднозначність навколо даного питання, яку вирішує стандарт RFC 9110, додавши статус 422 в стандарт: “*The 422 (Unprocessable Content) status code indicates that the server understands the content type of the request content (hence a 415 (Unsupported Media Type) status code is inappropriate), and the syntax of the request content is correct, but it was unable to process the contained instructions.*”

Друге спірне питання це статус код при виникненні помилки валідації бізнес правил. В контексті нашого прикладу це виклики функції *isSatisfiedOrFail* інтерфейсу специфікації. Ми можемо знайти питання бізнес валідації обговорюється у наступних гілках форумів:

- “422 or 409 status code for existing email during signup” [15];

- “Which HTTP response code for “This email is already registered?”” [16];

- “Should HTTP status codes be used to represent business logic errors on a server?” [17].

Запропоновані варіанти кодів є 400, 409 та 422. Аргументація помилковості коду 400 така ж як і у попередньому випадку – хоча 400 помилка і вважається загальною, та згідно стандарту вона

говорить про некоректно сформований запит. Розглянемо детальніше 409 та 422 коди. 409 говорить про конфлікт з поточним станом додатку. У випадку з бізнес валідаціями, ми зазвичай говоримо про неможливість виконати певну операцію за поточних умов, тобто ми маємо конфлікт з поточним станом, отже 409 код нас влаштовує. Водночас 422 код говорить про те, що сервер розуміє суть запиту, але не може виконати поточних інструкцій. Тобто обидва коди 409 та 422 можуть бути застосовані для помилок бізнес валідацій. Одним з варіантів диференціації даних кодів може бути наш приклад:

- *CanBeUpdatedSpecification* поверне викине помилку що трансформується в 409 код оскільки ми входимо в конфлікт з поточним станом системи.

- *ValidDataSpecification* поверне викине помилку що трансформується в 422 код оскільки ми не можемо виконати дію з новими даними і змінити стан системи на новий.

**Висновки.** Стаття спрямована на демонстрацію практичних можливостей використання HTTP статус кодів, що визначені в стандарті RFC 9110, зокрема кодів, пов'язаних з помилками валідації HTTP запитів. Шляхом аналізу спірних питань використання HTTP статусів та подальшого розгляду їх практичного застосування в контексті веб-додатків на платформі Node.js, ми показали, як новий стандарт може вплинути на розробку та управління даними в сучасних веб-додатках. Дана стаття спрямована на покращення розуміння можливостей і переваг використання стандартизованих HTTP статус кодів та допоможе розробникам зробити кращі рішення у своїх проектах.

### Список літератури:

1. Weaving the Web: the original design and ultimate destiny of the World Wide Web by its inventor / Berners-Lee, T. Harper Business, 2000. 246 с.
2. RFC 9110 HTTP Semantics [Електронний ресурс] / R. Fielding, M. Nottingham, J. Reschke. URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc9110.html>
3. HTTP response status codes [Електронний ресурс]. URL: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/HTTP/Status>
4. NestJS documentation [Електронний ресурс]. URL: <https://docs.nestjs.com>.
5. A Universally Unique Identifier (UUID) URN Namespace [Електронний ресурс] / P. Leach, M. Mealling, R. Salz / Липень 2005. URL: <https://www.ietf.org/rfc/rfc4122.txt>
6. Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures / R. Fielding – University of California, Irvine. 2000
7. Domain-Driven Design: Tackling Complexity in the Heart of Software / Eric Evans. Addison-Wesley Professional, 2003. 560 p.
8. “422 or 409 status code for existing email during signup” [Електронний ресурс]. URL: <https://stackoverflow.com/questions/50946698/422-or-409-status-code-for-existing-email-during-signup>
9. “Should POST request return 404 if reference to other entity fails?” [Електронний ресурс]. URL: <https://stackoverflow.com/questions/20250409/should-post-request-return-404-if-reference-to-other-entity-fails>
10. “StackOverflow: 400 vs 422 response to POST of data” [Електронний ресурс]. URL: <https://stackoverflow.com/questions/16133923/400-vs-422-response-to-post-of-data>
11. “StackOverflow: RFC – 404 or 400 for relation of entity not found in PUT request” [Електронний ресурс]. URL: <https://stackoverflow.com/questions/31773088/rfc-404-or-400-for-relation-of-entity-not-found-in-put-request>
12. “StackOverflow: RestApi: 404, 422 or 500?” [Електронний ресурс]. URL: <https://stackoverflow.com/questions/55166006/restapi-404-422-or-500>
13. RFC 4918 HTTP Extensions for Web Distributed Authoring and Versioning (WebDAV) [Електронний ресурс]. URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc4918>
14. RFC 7231 Hypertext Transfer Protocol (HTTP/1.1): Semantics and Content [Електронний ресурс]. URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc7231>
15. “422 or 409 status code for existing email during signup” [Електронний ресурс]. URL: <https://stackoverflow.com/questions/50946698/422-or-409-status-code-for-existing-email-during-signup>
16. “Which HTTP response code for “This email is already registered”?” [Електронний ресурс]. URL: <https://stackoverflow.com/questions/9269040/which-http-response-code-for-this-email-is-already-registered>
17. “Should HTTP status codes be used to represent business logic errors on a server?” [Електронний ресурс]. URL: <https://softwareengineering.stackexchange.com/questions/341732/should-http-status-codes-be-used-to-represent-business-logic-errors-on-a-server>

## **Ronskyi S.I. PRACTICAL APPLICATION OF RFC 9110 STATUS CODES IN THE CONTEXT OF HTTP REQUEST VALIDATION**

*It is hard to imagine the modern world without web applications. One of the key tasks in developing an architecture for such applications is the validation of input data and correct standardized HTTP responses. And although the HTTP protocol has existed for more than two decades, controversial issues still arise when developing web applications in the context of the response code status.*

*This article discusses the use of HTTP status codes. In particular, certain controversial use cases are investigated, and how these issues were resolved in the final standard RFC 9110. At the beginning, the article examines the chronology of changes in HTTP semantics standards, the basic use of status codes. The codes that are used as HTTP request validation error codes in various cases are considered in more detail, namely 400 (Bad Request), 401 (Unauthorized), 403 (Forbidden), 404 (Not Found) and 409 (Conflict). The use of code 422 (Unprocessable Entity), which is introduced in the latest standard, is considered separately and potentially resolves controversial issues.*

*To describe the problematic issues, an example of the controller code of a web application on the Node.js platform using the NestJS framework is considered. The article describes potential exception handlers related to input data validation and business rule validation. The article includes an analysis of discussions on controversial issues of HTTP response generation in the development community and a comparison of different approaches to using HTTP statuses. The first controversial issue under consideration is the formation of a response in the absence of a related entity in POST and PUT requests. That is, the case in which the client specifies an entity identifier in the request body, but this entity does not exist in the system. The second issue under consideration is the formation of an answer in the event of an exception related to business validation rules. The article points out the pros and cons of the different approaches and provides recommendations for using RFC 9110, including status code 422.*

**Key words:** *hypertext transfer protocol, web application, validation, architecture, code status.*

**Світлий І.М.**

Одеський національний технологічний університет

**Черняк О.І.**

Одеський національний технологічний університет

## ЩОДО АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ВИРОБНИЦТВОМ ПАРИ В КОТЛАХ ДКВР-10-13

*Значна частина технологічних процесів на промислових, сільськогосподарських, харчових підприємствах пов'язана з великим споживанням пари, яку виробляють парові котли у власних котельнях підприємств. Виклики сьогодення вимагають підвищення енергоефективності парових котлів, забезпечення ресурсозбереження, зменшення шкідливих викидів у зовнішнє середовище тощо. Вирішити ці складні завдання можливо, зокрема, шляхом підвищення інтелектуального рівня алгоритмів автоматичного керування виробленням пари у котлах. Тому актуальним є вдосконалення існуючих подібних систем автоматичного керування. Відомо чимало досліджень в цьому напрямку, однак існуючі системи керування виробленням пари не забезпечують необхідну динамічну точність керування внаслідок неврахування в контурі регулювання тиску пари в барабані котла істотного збурення – відбору пари споживачами. Авторами запропоновано ефективну систему автоматичного керування виробленням пари в котлі ДКВр-10-13 підвищеної динамічної точності на основі принципу інваріантності до контрольованого збурення. В ході проведеного дослідження було проаналізовано технологічний процес вироблення пари, розроблено комплекс моделей котла як об'єкта керування та здійснено їх цифрову реалізацію в середовищі Matlab Simulink; розроблено алгоритми керування, що забезпечують підвищення ефективності функціонування та динамічної точності стабілізації регульованих змінних котла, розроблено алгоритми логічного керування котлом; вибрано технічні засоби та розроблено технічну структуру системи керування котлом; розроблено графічний інтерфейс автоматизованого робочого місця оператора котельні на базі SCADA-системи Genie; розроблено програмне забезпечення для реалізації алгоритмів цифрового керування на функціонально- і вільно-програмованих контролерах; розроблено фрагменти проектної документації технічного забезпечення системи керування; обґрунтовано економічну доцільність та інвестиційну привабливість розробки, розглянуто питання техніки безпеки та охорони праці при експлуатації котла.*

**Ключові слова:** виробництво пари, котел, автоматизація, система автоматичного керування, підвищення динамічної точності.

**Постановка проблеми.** Значна частина технологічних процесів на промислових, сільськогосподарських, харчових підприємствах пов'язана з великим споживанням пари, яку виробляють встановлені в їх котельнях парові котли.

Виклики сьогодення вимагають підвищення енергоефективності парових котлів, забезпечення ресурсозбереження, зменшення шкідливих викидів у зовнішнє середовище тощо. Вирішення цих завдань традиційними шляхами за рахунок вдосконалення енергетичного обладнання низько ефективно. Необхідно впровадження сучасних систем автоматичного керування (САК). Однак складність котла як об'єкту керування не сприяла широким дослідженням та впровадженню передових підходів до автоматизації в сферу енергетики.

Таким чином, потреби практики у підвищенні технологічної ефективності та безпеки експлуата-

ції енергетичного обладнання з одного боку і існуючий рівень розвитку науки і техніки в цій галузі з іншого суперечать один одному. Шляхом усунення цієї суперечності може бути вдосконалення існуючих САК котельним обладнанням.

Серед задач, які стоять перед сучасними САК парогенеруючим обладнанням, основними є такі: надання оперативному персоналу достатньої, достовірної та своєчасної інформації про хід технологічного процесу, про стан обладнання та технічних засобів автоматизації; автоматичне керування технологічним обладнанням у різних режимах роботи; оптимальне ведення процесу з метою отримання теплоти заданої якості та кількості тощо.

Серед застосовуваних парових котлів широко розповсюджені агрегати типу ДКВр, в яких використовують традиційні, типові схеми



автоматичного керування, які однак не забезпечують достатню ефективність пароутворення. У зв'язку з цим необхідна розробка ефективних САК процесом виробництва пари. Зокрема актуальним є підвищення ефективності автоматичного керування котлом ДКВр-10-13.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанням автоматизації технологічного процесу виробництва пари займалися чимало дослідників. Так у СВ «Альтера» запропонували автоматизовану систему керування котельнею, яка містить автоматичне та ручне регулювання навантаження за температурою води на виході (для водогрійних котлів) або тиску пари (для парових) шляхом керування шиберами вентилятора та газової заслінки; автоматичне або ручне регулювання розрідження в топці шляхом керування шиберами димососа; автоматичне або ручне регулювання рівня води в барабані парового котла шляхом керування живильним насосом [1]. У ПП «Пром-МонтажНаладка» розробили САК котельнею, яка містить автоматичне підтримання заданого тиску пари в котлі, зміною подачі палива, автоматичне підтримання заданого рівня води в барабані котла, зміною подачі живильної води в котел, автоматичне підтримання тиску повітря на горіння пропорційно до обертів шнека подачі палива відповідно до співвідношення паливо-повітря зміною обертів двигуна вентилятора, автоматичне підтримання заданого розрідження в топці котла, зміною обертів двигуна димососа [2]. Р.К. Стаевич, О.В. Садовий та ін. запропонували безперервний вимір вмісту оксиду вуглецю в димовому тракті, витрати тиску повітря та палива, розрідження в димовому тракті, підтримування в топці заданого вмісту оксиду вуглецю та кисню шляхом зміни обертів вентилятора і димососа [3]. В.А. Барський розробив адаптивну систему керування тяго- дуттьовими механізмами котельних агрегатів ЕКО-3 [4]. Чимало вітчизняних дослідників розглядають рівень води в барабані котла як один з найважливіших його регульованих параметрів, оскільки його істотне зниження або підвищення суттєво знижує ефективність його роботи і може призвести до виходу з строю котла в цілому [5]. Раура А.С., Тарахтій О.С. обґрунтовують, що регулювання живлення котлів невеликої потужності здійснюється одноімпульсними регуляторами за сигналами датчиків рівня води в барабані. У котлах середньої та великої паропроductивності з малим водяним об'ємом застосовуються двоімпульсні регулятори живлення за рівнем води і витратою пари, а також триім-

пульсні, що регулюють живлення парового котла за сигналами по рівню води, витраті живильної води та витраті пари [6]. В.Я. Хоптій розглядає автоматизоване керування виробництвом пари, яке забезпечує підтримку витрати палива, температури, тиску пари, економію електрики [7]. Компанія Terplolider запропонувала САК подачею повітря в топку котла, шляхом виміру навантаження котла, витрати палива та повітря з керуючим впливом на приводи дуттьових вентиляторів та коригуючого впливу за співвідношенням паливо-повітря [8]. Ще одним відомим рішенням є САК подачею повітря в топку котла, що забезпечує режим оптимального горіння [9]. Серед зарубіжних пропозицій найбільшого поширення набули багатофункціональні пристрої автоматичного контролю якості процесу горіння на базі датчиків  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $NO_x$  тощо [10–12], однак такі системи можуть бути використанні лише з котлами певного типу.

Усі розглянуті рішення мають спільний недолік, - низьку динамічну точність керування внаслідок неврахування істотного збурення – відбору (споживання) пари споживачами.

**Постановка завдання.** Метою статті є аналіз можливості підвищення інтелектуального рівня алгоритмів автоматичного керування виробленням пари у котлі ДКВр-10-13 шляхом розробки ефективної САК підвищеної динамічної точності, інваріантної до контрольованого збурення.

**Викладення основного матеріалу.** На початку дослідження було проаналізовано процес виробництва пари як об'єкт керування, обґрунтовано доцільність модернізації системи автоматизації котла ДКВр-10-13 в котельнях переробних підприємств [13]. Виробляють пару котельні установки енергетичні, промислові та опалювальні. Промислові котельні харчових підприємств комплектують барабанними котлами малої та середньої потужності.

Барабанний котел складається з топкового пристрою для спалювання палива з повітрям (топка), випарника, підігрівача живильної води (економайзер), пароперегрівача, повітропідігрівача, насоса подачі поживної води, дуттьового вентилятора подачі повітря, витяжного вентилятора димових газів (димосос), каркасу та обмурівки, трубопроводів води, пари, повітря, газу, арматури, гарнітури.

Для харчових підприємств сьогодні доцільним є застосування котлів типу ДКВр паропроductивністю 0,7 кг/с (2,5 т/год), 1,11 кг/с (4 т/год), 1,81 кг/с (6,5 т/ч), 2,78 кг/с (10 т/год) і тиском

насиченої пари 1,3 МПа (13 кг/см<sup>2</sup>) з газомазутними топками, двобарабних, вертикально-водотрубних, призначених для вироблення як насиченої так і перегрітої пари для реалізації технологічних процесів підприємств, системи опалення, вентиляції та гарячого водопостачання тощо.

Розглянемо двобарабний котел водотрубний реконструйований ДКВр-10-13, що забезпечує продуктивність вироблення пари 2,78 кг/с (10т/год) тиском 1,3 МПа (13 кг/см<sup>2</sup>). Проаналізуємо його як об'єкт керування (ОК). Основними параметрами, що забезпечують тиск, температуру і витрату продукту – насиченої пари (її характеризують тиск  $P_n$  і витрата  $F_n$ ), є рівень води  $L_b$  і тиск у верхньому барабані  $P_b$ , що дорівнює  $P_n$ , розрідження у верхній частині топки –  $P_r$ , та співвідношення витрати палива  $F_r$  і витрати повітря, що нагнітається  $F_{вз}$ . Ці параметри можна віднести до регламентів – технологічного ( $P_n$ ), експлуатаційного ( $L_b$ ,  $P_r$ ) та техніко-економічного та екологічного ( $F_n$ ,  $F_r$ ). До останнього регламенту віднесемо також витрати живильної води  $F_b$ , витрати  $F_d$ , температуру  $T_d$ , склад  $Q_d$  (концентрацію  $O_2$  або  $CO_2$ , шкідливості –  $CO$ ,  $NO_x$ ,  $SO_y$ ) димових газів, витрату повітря, що нагнітається  $F_{вз}$  (рис. 1).

Ці показники залежать від вхідних та проміжних параметрів: температури  $T_b$  та тиску  $P_b$  живильної води, які віднесемо до сировинних параметрів; тиску  $P_r$ , температури  $T_r$ , теплоти згоряння палива – газу  $Q_r$ , температури  $T_{вз}$  та тиску  $P_{вз}$  повітря, що нагнітається вентилятором, тиску димових газів  $P_d$ , які віднесемо до енергетичних параметрів; ступінь відкриття регулюю-

чого органу (% х.р.о.) подачі живильної води  $u_b$ , газу –  $u_r$ , повітря –  $u_{вз}$  у топку, відведення димових газів –  $u_d$ , коефіцієнт теплообміну газів з поверхнею нагрівання котла  $\alpha$  – до механічних.

Барабаний паровий котел як об'єкт автоматичного регулювання характеризується рядом властивостей, що ускладнюють його автоматизацію. Це, в першу чергу, – велика кількість взаємопов'язаних вхідних та проміжних параметрів, по-друге, – наявність глибоких збурень щодо витрати пари (до 30 %), що відбирається технологічними споживачами, і, по-третє, – високі вимоги, що висуваються до точності підтримки вхідних та проміжних параметрів, надійності роботи засобів автоматизації.

Для отримання економічного ефекту від модернізації системи автоматизації котла ДКВр-10-13 необхідно забезпечити виконання умов експлуатаційного та технологічного регламентів. Вироблення гріючої пари регламентується її тиском  $P_n$  і рівнем води  $L_b$  в барабані котла, – віднесемо їх до регульованих координат. До регулюючих параметрів віднесемо положення регулюючих органів подачі газу на пальник  $u_r$  та подачі живильної води в барабан котла  $u_b$ . Решту вхідних параметрів віднесемо до збурень.

Процес регулювання будемо розглядати на часовому проміжку, порівняному з тривалістю зміни на підприємстві. За цей період основні параметри газу, повітря та живильної води змінюються незначно. Тому зміни цих параметрів врахуємо у складі векторів неконтрольованих збурень  $f_1$  і  $f_2$ . Оскільки котел працює в умовах

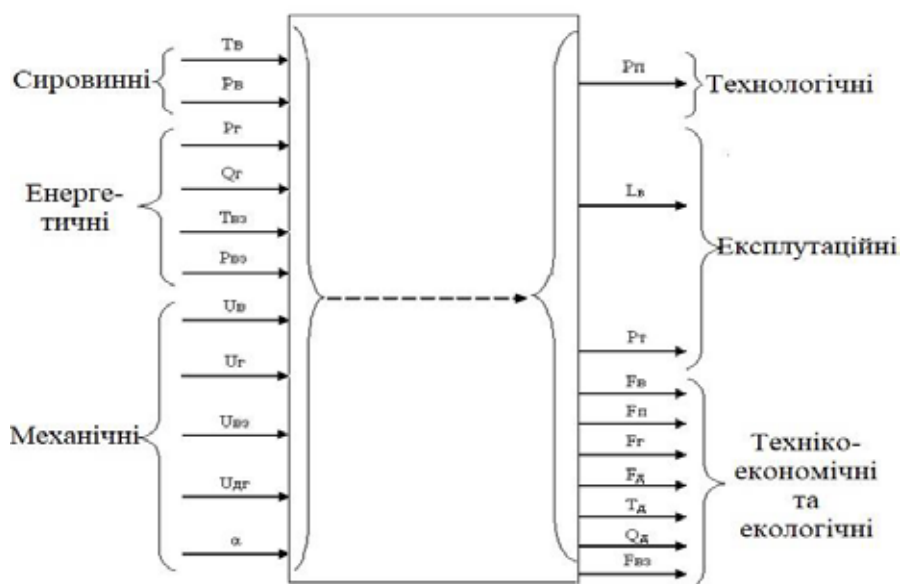


Рис. 1. Параметрична схема вироблення пари в котлі ДКВр-10-13

змінного навантаження, для підвищення якості регулювання доцільно враховувати споживання пари, що характеризує навантаження котла. Тому витрати пари  $F_{\Pi}$  доцільно віднести до контрольованих збурень. Побудовано координатну схему ОК (рис. 2).

Проведено активний та пасивний експеримент, розроблено комплекс математичних моделей технологічного процесу отримання гріючої пари в котлі ДКВр-10-13 як ОК за результатами параметричної ідентифікації, якій були піддані перехідні характеристики, отримані «експериментальним» шляхом. Моделі реалізовані в середовищі Matlab, отримані перехідні характеристики. Одержані моделі є адекватними реальному об'єкту, і їх використано для аналізу та синтезу САК аналізованим агрегатом. В основу її побудови покладено принцип замкненого керування.

Як показали проведені дослідження, система автоматичного регулювання (САР) тиску пари в барабані котла в умовах дії збурень має недостатню динамічну точність, на яку впливає канал контрольованого збурення « $F_{\Pi} - P_{\Pi}$ ». Доцільним є підвищення динамічної точності САР шляхом компенсації дії контрольованого збурення на контур регулювання тиску пари за рахунок побудови САР, інваріантної до контрольованого збурення (рис. 3).

В результаті підвищення динамічної точності САР за рахунок введення в регулятор тиску пари коригуючого зв'язку в умовах дії збурень якості перехідних процесів і за тиском пари, і за рівнем води в барабані покращилася як за інтегральним критерієм, так і за прямими показниками якості (рис. 4, табл. 1).

Розроблено алгоритми логічного керування для підсистеми захисту котла від режимів роботи з несприятливими наслідками, для підсистем технологічного пуску та останову.

Обрано технічні засоби збирання інформації про хід технологічного процесу та впливу на нього, збирання інформації про стан обладнання та керування ним, розроблено технічну структуру системи керування котлом, а для цього попередньо визначено характеристики середовища, з яким взаємодіють засоби автоматизації та обслуговуючий персонал. Визначено задачі системи керування котельнею, вивчено розподілення функцій між рівнями керування.

Розглянуто альтернативні варіанти технічної структури на базі засобів збору даних Adam-5000/485 та плати ПЗО типу Adam-5050, Adam-

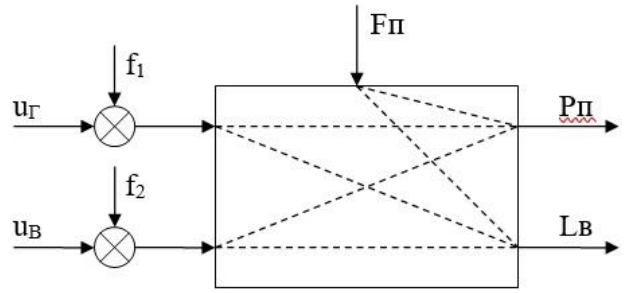


Рис. 2. Координатна схема об'єкта керування

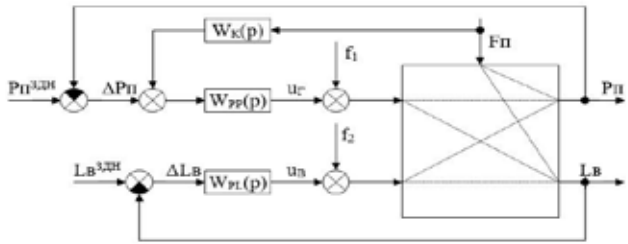


Рис. 3. Структурна схема САР підвищеної динамічної точності  $P_{\Pi}^{зад}$ ,  $L_B^{зад}$  – задані значення тиску гріючої пари та рівня води в барабані котла;  $\Delta P_{\Pi}$ ,  $\Delta L_B$  – помилки регулювання тиску гріючої пари та рівня води в барабані;  $W_K(p)$ ,  $W_{PP}(p)$ ,  $W_{PL}(p)$  – передаточні функції корегуючого зв'язку, регулятора тиску гріючої пари, регулятора рівня води в барабані котла відповідно

5017, Adam-5024, WAGO I/O, Octagon System, які однаковою мірою забезпечують реалізацію алгоритмів керування. Порівняльний аналіз їх вартості за критерієм ціна-якість показує, що мінімальні витрати на комплектацію системи забезпечує використання як бази технічної структури ADAM серії 5000.

Розроблено графічний інтерфейс автоматизованого робочого місця оператора котельні (рис. 5) на базі SCADA-системи Genie, який дозволяє отримувати вичерпну кількісну інформацію про стан котла. Кольорова, текстова та анімаційна сигналізація дозволяє якісно оцінити хід процесу.

Розроблено програмне забезпечення для реалізації цифрових алгоритмів керування на функціонально- та вільно- програмованих контролерах ADAM фірми Advantech і робоча станція на базі IBM PC сумісного комп'ютера, на якому встановлена SCADA-система «Genie».

Розроблено комплект проектної документації на систему автоматизації.

Проект удосконалення САК вироблення пари в котлі ДКВр-10-13 є інвестиційно привабливим; розглянуто питання охорони праці та техніки безпеки.

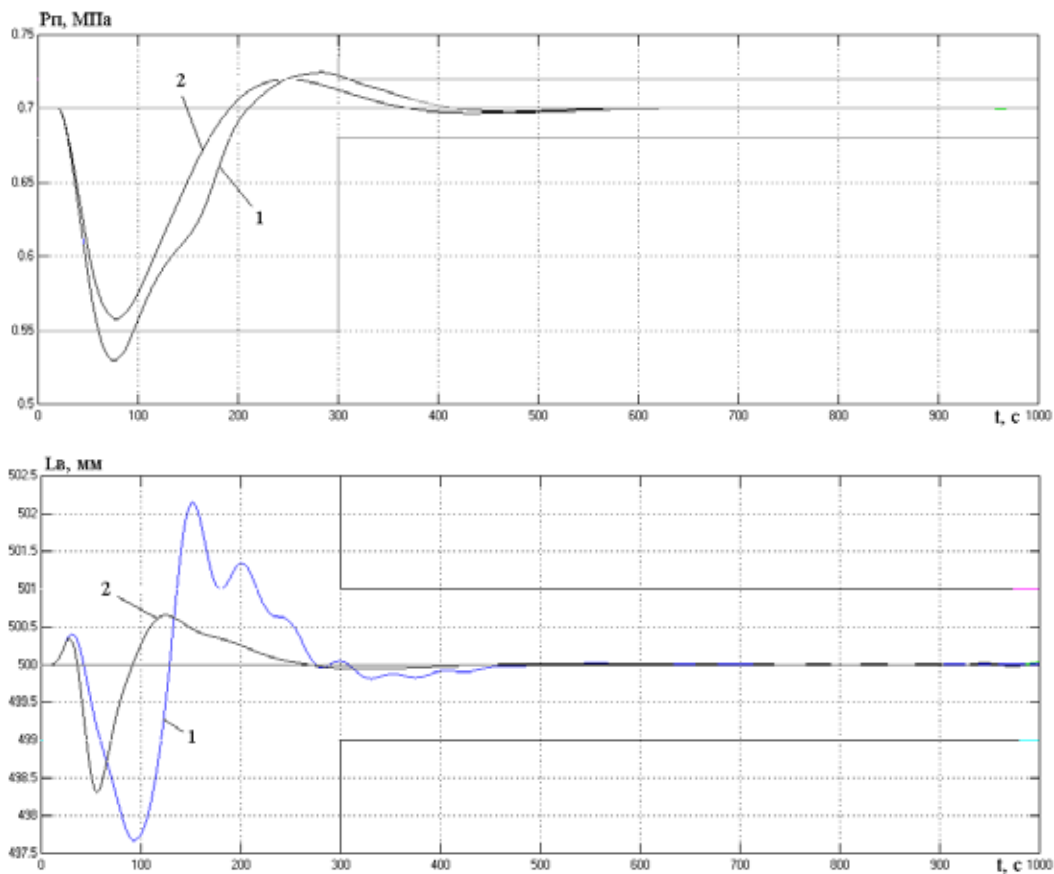


Рис. 4. Результати моделювання роботи САР базової структури (1) та підвищеної динамічної точності (ПДТ) (2) в умовах дії контрольованих та неконтрольованих збурень детермінованого характеру

Таблиця 1

Порівняльний аналіз САР базової структури та ПДТ

| Вид САР                            | $\Delta P_n^{max}$ , МПа | $\Delta L_b^{max}$ , мм | $T_{пн1}$ , с | $T_{пн2}$ , с | Значення критерію |
|------------------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------|---------------|-------------------|
| САР базової структури              | 0,17                     | 2,33                    | 310,3         | 215,9         | 635,3             |
| САР підвищеної динамічної точності | 0,14                     | 1,69                    | 170,9         | 69,8          | 225,5             |

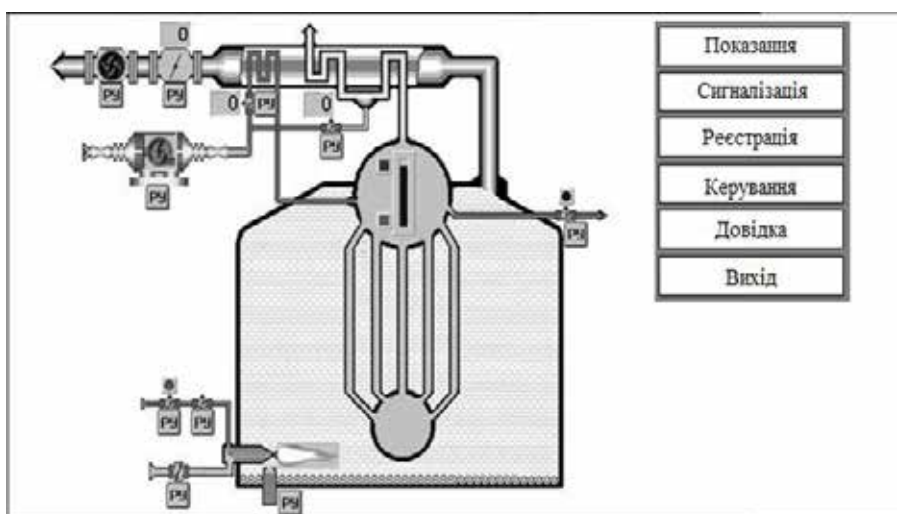


Рис. 5. Основне вікно стратегії

**Висновки.** Актуальним є вдосконалення САК вироблення пари в парових котлах. Відомі САК мають низьку динамічну точність внаслідок неврахування відбору пари споживачами. Запропоновано ефективну САК вироблення пари в котлі ДКВр-10-13 підвищеної динамічної точності, інваріантної до контрольованого збурення. Розроблено комплекс математичних моделей процесу вироблення пари в котлі ДКВр-10-13, проведено їх параметричну та структурну ідентифікацію.

Розроблено графічний інтерфейс автоматизованого робочого місця оператора котельні. Розроблено програмне забезпечення для реалізації цифрових алгоритмів керування на функціонально- та вільно- програмованих контролерах ADAM фірми Advantech і робоча станція на базі IBM PC сумісного комп'ютера. Розроблено комплект проектної документації на систему автоматизації. Проект удосконалення САК вироблення пари в котлі ДКВр-10-13 є інвестиційної привабливим.

### Список літератури:

1. Офіційний сайт СВ Альтера. URL: [https://www.svaltera.ua/solutions/typi\\_cal/water\\_supply/7705.php](https://www.svaltera.ua/solutions/typi_cal/water_supply/7705.php) (дата звернення: 16.05.2024).
2. Офіційний сайт ПП ПромМонтажНаладка. URL: <https://promnaladka.com.ua/poslugi/36-avtomatizacija-parovih-kotelen-palivo-luz-ga-sojashnika.html> (дата звернення: 16.05.2024).
3. Патент UA № 36015. Спосіб автоматичного керування, контролю, захисту та сигналізації котлоагрегату / Р.К. Стасевич, О.В. Садовой, В.І. Романенко та ін. МПК F23N1/02; заявл. 12.05.2008 № 200806227. Опубл. 10.10.2008. Бюл. № 19.
4. Барський В.А., Фрішман А.Є., Лисенко А.Ю. Адаптивна система керування тягодуттьовими механізмами котельних агрегатів ЕКО-3 / *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, 2012. № 3. С. 199–201.
5. Фам В.Д., Коновалов В.І. Дослідження варіантів побудови САР рівня в барабані парового котла / *Збірник праць XI міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих учених*, 2013. С. 225–227.
6. Рура А.С., Тарахтій О.С. Аналіз існуючих схем регулювання рівня в барабані парового котла / *Молодий вчений*, 2019. № 11 (75). С. 163–166.
7. Хоптій В.Я. Автоматизація технологічних процесів котельних установок, як підсистеми об'єкту управління / *Техніка будівництва*, 2002 № 12. С. 81–84.
8. Офіційний сайт компанії Teplolider. URL: <https://teplolider.ua/uk/korysno-znaty/avtomatyka-v-tverdopalynnomu-kotli-serii-kvt-lider.html> (дата звернення: 16.05.2024).
9. Патент UA № 46215 Спосіб та система (варіанти) автоматичного управління подаванням повітря в топку котла / І.В. Шаповал. МПК F23N3/00; заявл. 03.01.2001 № 2001010052; опубл. 15.05.02, Бюл. № 5/ 2002.
10. USA 5585547, IPC G01N 27/26. Oxygen sensor probe for boiler / Ki S. Kim, Han S. Song, Geun C. Yum, Dae J. Ko (Rep. of Korea) – № 369537; fil. 5.01.1995; publ. 17.12.1996. 8 p.
11. USA 7756591B2, IPC G05B 13/02. System for optimizing oxygen in a boiler / J. Jia, S. Piche, H. Beaver (USA) – № 11/680084; fil. 25.04.2006; publ. 13.07.2010. 22 p.
12. USA 8230825B2, IPC F22B 37/42. Boiler control system / Warren G. Knorr, Jr (USA) – № 12/045,294; fil. 10.03.2008; publ. 31.07.2012. 14 p.
13. Черняк О.І. Автоматизація котлоагрегату переробного підприємства (рукопис). Одеса : ОНАХТ, 2011. 180 с.

### **Svityi I.M., Cherniak O.I. ABOUT STEAM PRODUCTION AUTOMATIC CONTROL IN BOILERS DKVr-10-13**

*A significant part of the technological processes at industrial, agricultural, and food enterprises is connected with the large consumption of steam produced by steam boilers in the enterprises' own boiler rooms. Today's challenges require increasing the energy efficiency of steam boilers, ensuring resource conservation, reducing harmful emissions into the environment, etc. It is possible to solve these complex tasks, in particular, by increasing the intellectual level of algorithms for automatic control of steam production in boilers. Therefore, it is urgent to improve the existing similar automatic control systems. A lot of research in this direction is known, but the existing control systems do not provide the necessary dynamic accuracy of control due to the failure to take into account in the steam pressure regulation circuit in the boiler drum a significant disturbance – the selection of steam by consumers. The authors proposed an effective system of automatic control of steam production in the DKVr-10-13 boiler of increased dynamic accuracy based on the principle of invariance to a controlled disturbance. In the course of the research, the technological process of steam generation was analyzed, a set of boiler models was developed as a control object, and their digital implementation was carried out in the Matlab Simulink environment; control algorithms have been*

*developed, which ensure an increase in the efficiency of operation and dynamic accuracy of stabilization of regulated variables of the boiler, algorithms for logical control of the boiler have been developed; technical means were selected and the technical structure of the boiler control system was developed; the graphic interface of the automated workplace of the boiler plant operator based on the Genie SCADA system was developed; developed software for the implementation of digital control algorithms on functional and freely programmable controllers; fragments of project documentation for technical support of the control system were developed; the economic expediency and investment attractiveness of the development are substantiated, the issue of safety and occupational health and safety during the operation of the boiler is considered.*

**Key words:** *steam generation, boiler, automation, automatic control system, dynamic accuracy improvement.*

**Serdyuk O.V.**

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

**Stelmakh N.V.**

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

## REVIEW AND ANALYSIS OF METHODS OF RECONSTRUCTION AND MATHEMATICAL DESCRIPTION OF CT IMAGES

*Computed tomography is one of the main tools in medical diagnostics, providing detailed images of the internal structures of the body. Due to its ability to visualize organs, tissues, and bones in high resolution, CT plays a critical role in the detection and monitoring of various diseases, including cancer, cardiovascular disease, and trauma. Therefore, improving CT image reconstruction methods is an important area of research that contributes to the efficiency of diagnosis and treatment of patients. This paper analyzes the latest research on mathematical modeling of computed tomography (CT) image reconstruction, which indicates significant progress in the use of deep machine learning methods and other advanced algorithms. These studies emphasize the importance of an interdisciplinary approach, combining mathematical modeling, machine learning, and medical physics to improve CT reconstruction methods. This helps to improve the efficiency of diagnosis and treatment of patients by providing more accurate and high-quality images with a lower radiation dose.*

*The paper deals with the problem of improving the quality of reconstruction of computed tomography (CT) images using modern mathematical methods and various reconstruction algorithms. This allows to significantly improve the image quality by gradually refining the reconstruction, which increases diagnostic accuracy, reduces noise and artifacts. Methods for reconstruction and mathematical description were analyzed. The analysis revealed that the most effective methods were iterative methods, such as maximum likelihood, Veo, and algebraic reconstruction. Iterative methods are especially useful in complex cases where classical methods cannot provide sufficient quality of reconstruction. Hybrid methods that combine the advantages of classical and iterative methods and are adapted to specific low-dose patient scanning conditions have been presented quite successfully.*

**Key words:** *CT images, mathematical description of CT images, digital processing of CT images, improvement of interpretation reliability, reconstruction, automation of CT image recognition.*

**Formulation of the problem.** Despite significant progress in the use of mathematical methods for CT image reconstruction, there are aspects that require further improvement [1]. One of the factors is defects such as noise and artifacts, which can significantly affect the accuracy of diagnosis, radically distorting the image and making it impossible for the human eye to perceive the image correctly, so their reduction is critical for reliable diagnosis of human pathologies.

Also, processing large amounts of data obtained during CT scanning remains a challenge. Modern deep learning methods require significant computing resources, so it is necessary to develop more efficient algorithms that will allow faster processing of this data without losing quality.

There is also a problem with the interpretability of deep learning models. Hybrid models that combine traditional methods with deep learning techniques should be improved to ensure their comprehensibility and interpretability for medical professionals.

Current methods of CT image reconstruction do not always provide an optimal balance between reducing radiation dose and maintaining high quality of the acquired CT image. Iterative methods, such as ISTA, FISTA, ADMM and Primal-Dual algorithms, need to be further developed to help more effectively address dose reduction while maintaining image quality” [2].

**Analysis of recent research and publications.** To date, considerable experience has been gained in applying various mathematical methods to describe the formation of CT images and reconstruction of these images, the results of which are presented in the works of domestic and foreign researchers.

The studies by Li, Meng [3] and Uthoff illustrate the effectiveness of 3D CNNs in achieving high sensitivity and specificity, providing accurate diagnostic results. These achievements not only improve patient safety but also demonstrate the potential of deep learning to maintain diagnostic accuracy even with reduced radiation doses.

In [4], an algorithm for pre-processing images obtained by CT of the OGC was created and obtained based on the use of threshold methods of image segmentation, morphological operations, and histogram processing. Their study made it possible to obtain the most informative and unencumbered image for further analysis.

Researchers such as Park, Sungeun [5] and Higaki, Toru have explored new methods, including deep learning and cycleGAN algorithms, to address the challenges in sparse-image CT reconstruction. These methods effectively reconstruct images from limited data, providing a potential solution to the problem.

The team of authors [6] proposed the FDK neural network algorithm (NN-FDK), which is an algorithm for reconstructing the geometry of computed tomography (CT) with a circular cone beam (CCB) with a machine learning component. The machine learning component of the algorithm is designed to learn a set of FDK filters and combine FDK reconstructions performed using these filters. This results in a computationally efficient reconstruction algorithm, as it only needs to compute and combine the FDK reconstructions for this learned filter set. Due to the parameterization of the learned filters, the NN-FDK network has a low number of parameters and can be efficiently trained using the Levenberg-Marquardt algorithm with an approximate quadratic convergence rate.

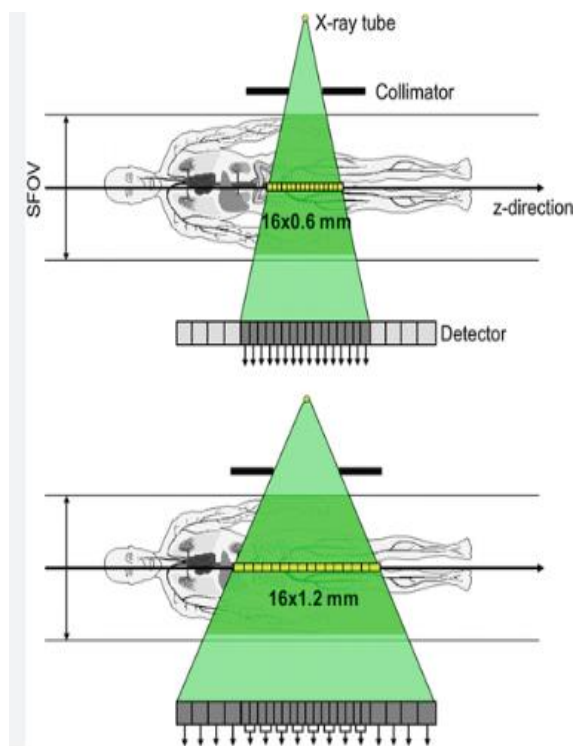


Fig. 1. CT image formation

Researchers have proposed a deep inverse encoder-decoder reconstruction (DEAR) network for reconstructing 3D computed tomography images from multiple views [7]. Compared to other two-dimensional deep learning methods, the proposed DEAR-3D network can utilize 3D information to obtain promising reconstruction results.

In [8], a 3D deep convolutional neural network (CNN) with multiscale prediction was used to detect pulmonary nodules after the lungs were segmented in a chest computed tomography scan using an integrated method. Compared with 2D CNN, 3D CNN can utilize richer spatial 3D contextual information and generate more discriminative features after training on 3D samples to fully represent lung nodules. In addition, a multi-scale pulmonary nodule prediction strategy, including multi-scale cube prediction and cube clustering, is further proposed to detect extremely small nodules.

The authors of the CGAN algorithm [9] use auxiliary input conditions to create spectral CT images, which increases the accuracy of ultra-high resolution (SR) images. The EDLF algorithm is proposed to take into account the edges in the created SR CT images, which reduces the deformation of the created image. Secure SR images created using a deep learning method are used to perform 3D reconstruction. We extended the 3D reconstruction algorithm of ray casting, which reduces the number of rays by selecting a suitable bounding box. This 3D ray casting reconstruction algorithm reduces time and memory consumption.

**Purpose and task statement.** The aim of the study is to analyze and classify methods of mathematical description of CT images and reconstruction algorithms, which will improve existing methods and algorithms while ensuring high reliability of the obtained CT image while reducing the radiation dose to the patient.

**Presentation of the main research material.** Let's consider the main stages of digital computed tomography image processing. The process of forming CT images includes several key processes, each of which requires the use of special mathematical methods.

First, you need to obtain data from a CT scanner from different angles. During the scan, X-rays pass through the patient's body, and detectors record how this radiation is absorbed by various organs and tissues Fig. 1.

Next, analog signals are converted to digital signals through the process of processing and forming images by mathematical algorithms from



raw data, which look like a sinogram, where the classical algorithm is filtered back projection (FBP) [10]. Each stage plays an important role in creating high-quality two-dimensional and three-dimensional images Fig. 2.

Let's consider the stages of classical CT image reconstruction.

The forward radon transformation describes how X-rays pass through an object, changing depending on the position and angle of the beam. The inverse radon transformation is used to restore the original distribution of X-ray absorption inside an object. A large number of projections are required for accurate restoration, which in turn increases the radiation dose to the patient.

The Fourier transform is used to analyze the image in the frequency domain, which allows to isolate periodic components. The forward and inverse Fourier transform helps to reconstruct images from projection data.

Wavelet filtering is used to highlight and enhance different areas of an image, which reduces noise and improves image quality. Wavelet filtering is based on decomposing an image into different levels of detail.

Existing CT image reconstruction algorithms can be divided into two main groups: algorithms based on transformations and algorithms that use a series expansion of a function.

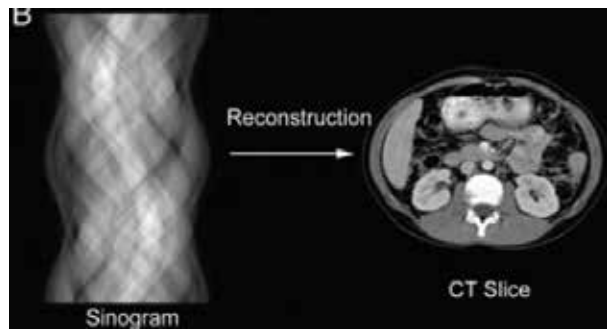
The first group includes the convolutional algorithm, which includes differentiation and the Hilbert transform replaced by a convolution operation. This algorithm is characterized by high computational accuracy and low machine time, which makes it widely used in medical imaging. But it can be less effective for collimation up to 1 mm [11].

The second group includes algorithms based on the Fourier transform:

They use the Fourier transform to analyze and reconstruct images in the frequency domain. These algorithms are characterized by high noise immunity and computational speed. They are also characterized by the loss of local information during the transformation and a limited ability to work with nonlinear artifacts.

In addition to analytical methods, there are iterative reconstruction methods, such as the algebraic reconstruction technique (ART) and the maximum likelihood method (MLEM). These methods use an initial image estimate and gradually improve it by comparing it to measured values and adjusting until consistency is achieved.

The algebraic reconstruction technique (ART) is one of the first iterative methods that uses a series



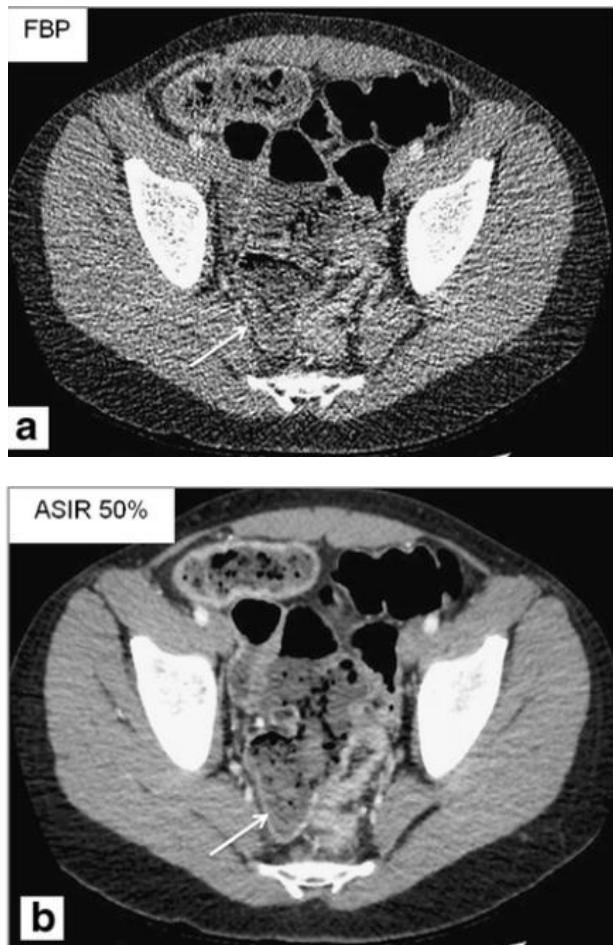
**Fig. 2. Reconstruction of CT image of the abdominal cavity**

of projections to reconstruct the desired object [12]. This method involves solving a system of linear equations, where each equation corresponds to one projection. During the iteration process, the initial image is constantly updated by comparing it with the actual measured values and adjusting it according to the weighted coefficients. This allows you to get a more accurate and improved image, especially in the presence of noise or a limited number of projections.

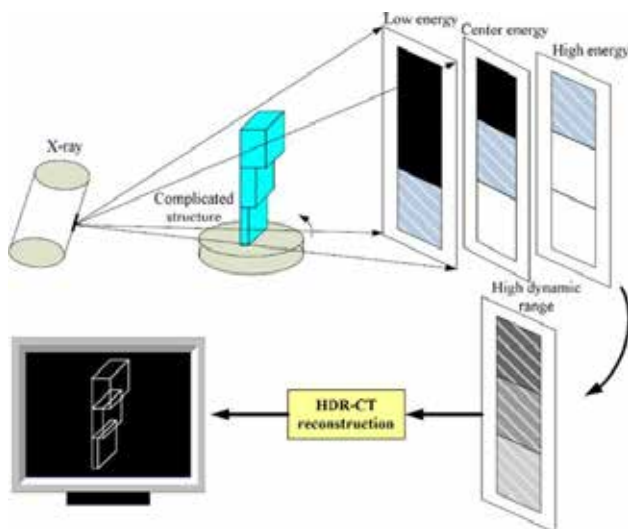
The maximum likelihood method (MLEM) is another iterative approach that uses statistical models to estimate the probability of the measurements obtained [13]. This method is especially useful for low-dose CT (LDCT), where the amount of data is limited and the noise level is high. MLEM optimizes the log-likelihood function by taking into account penalty terms to reduce artifacts and improve image quality. This method may require a large number of iterations to achieve a stable result and requires accurate statistical models to be effective.

Vevo reconstruction (ASIR-V) is an advanced technology with the advantage of reducing the patient's radiation dose.

Vevo and ASIR-V (Adaptive Statistical Iterative Reconstruction-Vevo) are iterative reconstruction methods with regularization, which consists of two parts: matching the measured data and regularizing (smoothing) the reconstructed image, which is different from traditional back-projection algorithms such as FBP. The ASIR-V version uses a statistical reconstruction algorithm and statistical models to estimate the probability that a given image matches the measured data, taking into account noise and artifacts. It is widely used in medical institutions where radiation dose reduction is required, for example, in children or patients who need frequent examinations, reducing radiation doses by 50–70 % compared to traditional reconstruction methods, but may be less effective for image types with disturbed scanning conditions.



**Fig. 3. Improving image quality with ASIR-V reconstruction**



**Fig. 4. The principle of HDR-CT image**

Fig. 3 shows the difference in image quality between classical FBP reconstruction and ASIR-V in a 14-year-old patient weighing 48 kilograms, who underwent a CT scan with a reduced dose of

0.9 mSv, the purpose of the examination was to detect pathology of the intestinal wall [14].

We will also consider a set of methods for combined approaches to image reconstruction.

Hybrid methods are a combination of analytical and iterative methods using machine learning. For example, FBP is first applied for primary reconstruction, and then DNNs are used to improve image quality [15]. Hybrid methods allow taking advantage of both approaches to achieve better results. The disadvantages are high computational costs and the complexity of integrating different methods into a single system.

Methods based on Vision Transformers are used to reconstruct images without convolutional operations, which allows processing large data sets with high accuracy [16; 17]. However, it requires large computational resources and complex setup, and still requires additional research for optimization.

Statistical methods with likelihood estimation, where maximization of the likelihood function with additional penalty terms is used to reduce artifacts and improve image quality in low-dose conditions. Statistical methods allow for more reliable results in conditions of limited data.

Data preprocessing methods involve the use of data preprocessing to reduce noise and improve the quality of projection data before reconstruction. This includes normalization, filtering, and other methods to improve the quality of the original data [18].

Another possible method of improving image reconstruction is the use of high dynamic range (HDR) technology.

This technology allows to obtain images with high dynamic range, which ensures the display of details in both light and dark areas of the image. In the context of CT, this can be particularly useful in the process and stages of image processing and manipulation.

HDR allows for better visibility of various structures in the body, including soft tissues, bones, and blood vessels, which can have different densities and therefore reflect different signal levels, thus improving contrast [19].

The use of HDR helps to minimize artifacts caused by different exposure levels in different parts of the image (Fig. 4).

For complex components, obtain multi-voltage sequences from the same projection angle that respond to different thicknesses. Then, use the fusion of HDR and CT reconstruction to obtain complete information.

Higher dynamic range provides more detailed images, which helps doctors diagnose diseases and assess patient conditions more accurately. HDR technologies can help reduce the radiation dose

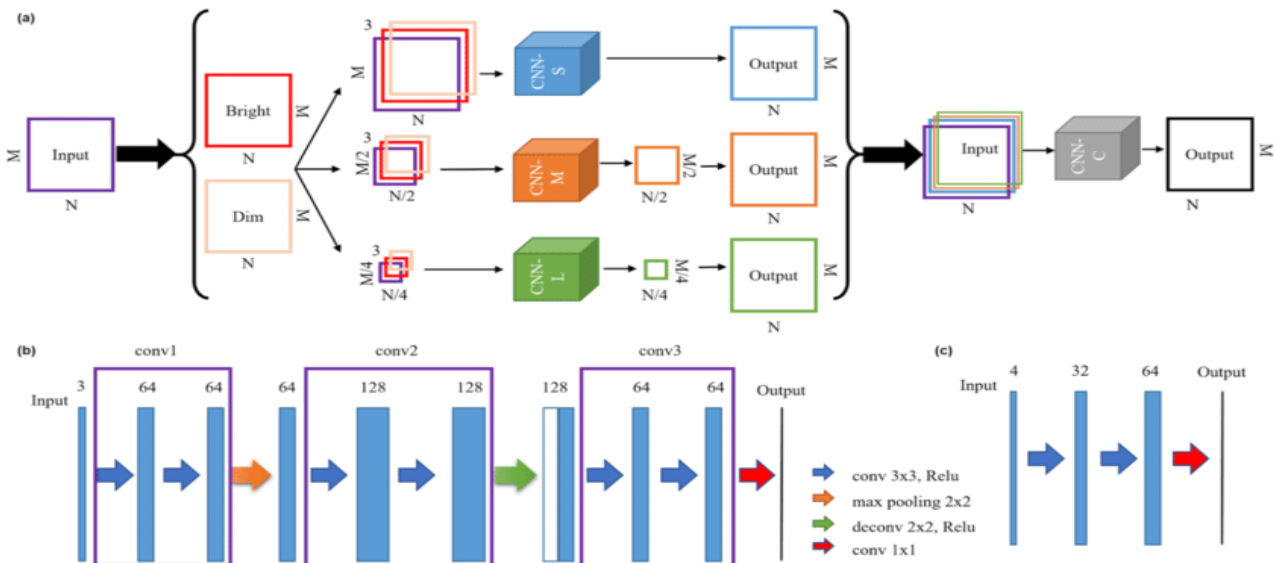


Fig. 5. CNN hierarchical synthesis architecture

required to produce high-quality images by optimizing the use of existing data and improving image quality without additional patient exposure.

Let's consider existing methods for improving the mathematical analysis of computed tomography images using machine learning.

Deep neural networks (DNNs) are used to improve image quality by reducing noise and artifacts. For example, UNet and GAN (Generative Adversarial Networks) are used to eliminate noise in low-dose CT (LDCT) images [20].

Convolutional neural networks (CNNs) are suitable for image translation tasks, including reconstruction of low-dose images and contrast enhancement [21]. CNNs can automatically detect important features of images, which improves the quality of reconstruction and diagnosis Fig. 5. (a) Proposed general network architecture of hierarchical synthesis CNN (HSCNN). Bright and dim bands are obtained by filtering pixels above and below the average intensity, respectively. The spatial spectral bands L, M, and S are obtained using low-pass filters at different resolution scales. The detailed design of the feature fusion network is shown for the first stage (b) and for the second stage (c) [22].

**Conclusions.** Computed tomography as an imaging method is heavily dependent on complex

mathematical algorithms and powerful computing resources to produce high-quality images. Advances in computing and reconstruction algorithms continue to improve the capabilities of CT, making it an indispensable tool in medical diagnostics and research.

Modern techniques such as iterative approaches, machine learning, and combined techniques significantly increase resolution and signal-to-noise ratio (SNR), providing high-quality images with less radiation dose. The use of HDR imaging adds additional value by improving contrast and image detail.

The quality of CT images is crucial for a radiologist. High image quality allows for accurate identification of anatomical details and pathological changes, which is critical for correct diagnosis. The accuracy of diagnosis, in turn, directly affects the effectiveness and correctness of the prescribed treatment. Improved image reconstruction methods help to reduce the number of misdiagnoses and improve treatment outcomes, which is extremely important for patients.

Thus, further development of mathematical methods and algorithms for computed tomography is necessary to provide high-quality images that will help doctors in accurate diagnosis and effective treatment of patients.

### Bibliography:

1. Rahman, H., Khan, A.R., Sadiq, T., Farooqi, A.H., Khan, I.U., Lim, W.H. A systematic literature review of 3D deep learning techniques in computed tomography reconstruction. *Tomography*, 2023, vol. 9, no. 6, pp. 2158–2189. Available at: <https://doi.org/10.3390/tomography9060169>

2. Zhao, L., Li, X., Wang, Y. Intelligent traffic flow prediction based on deep learning in a connected transportation system. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022. Available at: <https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3179876>

3. Li, M., Shen, S., Gao, W., Hsu, W., Cong, J. Computed tomography image enhancement using 3D convolutional neural network. In Proceedings of the Deep Learning in Medical Image Analysis and Multimodal Learning for Clinical Decision Support: 4th International Workshop, DLMIA 2018, and 8th International Workshop, ML-CDS 2018, Held in Conjunction with MICCAI 2018, Granada, Spain, 20 September 2018; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2018, pp. 291–299.
4. Nosovets, O. Способи попередньої обробки зображень КТ ОГК для діагностики тромбоемболії легеневої артерії. Academia.edu, 2022. Available at: <https://www.academia.edu/100690153>
5. Park, S., Yoon, J.H., Joo, I., Yu, M.H., Kim, J.H., Park, J., Kim, S.W., Han, S., Ahn, C., Kim, J.H., et al. Image quality in liver CT: Low-dose deep learning vs standard-dose model-based iterative reconstructions. *Eur. Radiol.*, 2022, vol. 32, pp. 2865–2874.
6. Kovacs, A., Smith, J. Advances in imaging technology. *J. Imaging*, 2020, vol. 6, no. 12, article 135. Available at: <https://doi.org/10.3390/jimaging6120135>
7. Xie, H., Shan, H., Wang, G. Advances in bioengineering. *Bioengineering*, 2019, vol. 6, no. 4, article 111. <https://doi.org/10.3390/bioengineering6040111>
8. Gu, Y., Lu, X., Yang, L., Zhang, B., Yu, D., Zhao, Y., Gao, L., Wu, L., Zhou, T. Automatic lung nodule detection using a 3D deep convolutional neural network combined with a multi-scale prediction strategy in chest CTs. *Computers in Biology and Medicine*, 2018, vol. 103, pp. 220–231.
9. Liang, C.H., Liu, Y.C., Wu, M.T., Garcia-Castro, F., Alberich-Bayarri, A., Wu, F.Z. Identifying pulmonary nodules or masses on chest radiography using deep learning: External validation and strategies to improve clinical practice. *Clinical Radiology*, 2020, vol. 75, pp. 38–45.
10. Devaney, A.J. A filtered backpropagation algorithm for diffraction tomography. *Ultrasonic Imaging*, 1982, vol. 4, pp. 336–350.
11. Leidholdt, E.M., Boone, J.M. (Eds.). The essential physics of medical imaging. 2nd ed. Philadelphia, PA: Lippincott Williams & Wilkins, 2004, pp. 327–372.
12. De Pierro, A.R. Problemas Matemáticos em Tomografia por Emissão. Notas, UNICAMP, 2004.
13. IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. 2010, October–November, pp. 2614–2616. Available at: <https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2010.5874262>
14. Kim, I., Kang, H., Yoon, H.J., Chung, B.M., Shin, N.Y. Deep learning-based image reconstruction for brain CT: Improved image quality compared with adaptive statistical iterative reconstruction-Veo (ASIR-V). *Neuroradiology*, 2021, vol. 63, pp. 905–912.
15. Zeng, L., Xu, X., Zeng, W., Peng, W., Zhang, J., Sixian, H., Liu, K., Xia, C., Li, Z. Deep learning trained algorithm maintains the quality of half-dose contrast-enhanced liver computed tomography images: Comparison with hybrid iterative reconstruction: Study for the application of deep learning noise reduction technology in low dose. *Eur. J. Radiol.*, 2021, vol. 135, article 109487.
16. N. Stelmakh, I. Mastenko, O. Sulima, & T. Rudyk, “Features of the implementation of computer vision in the problems of automated product quality control”, *Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, 2023. 13 (1), pp. 38–41, DOI: 10.35784/iapgos.3434
17. Beister, M., Kolditz, D., Kalender, W.A. Iterative reconstruction methods in X-ray CT. *Phys. Medica*, 2012, vol. 28, pp. 94–108.
18. Gupta, H., Jin, K.H., Nguyen, H.Q., McCann, M.T., Unser, M. CNN-based projected gradient descent for consistent CT image reconstruction. *IEEE Trans. Med. Imaging*, 2018, vol. 37, pp. 1440–1453.
19. Chen, P., Han, Y., Pan, J. High-dynamic-range CT reconstruction based on varying tube-voltage imaging. *PLOS ONE*, 2015, vol. 10, no. 11. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0141789>
20. Shen, L., Zhao, W., Xing, L. Patient-specific reconstruction of volumetric computed tomography images from a single projection view via deep learning. *Nat. Biomed. Eng.*, 2019, vol. 3, pp. 880–888.
21. Jiao, F., Gui, Z., Li, K., Shangguang, H., Wang, Y., Liu, Y., Zhang, P. A dual-domain CNN-based network for CT reconstruction. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 71091–71103.
22. Olexandra Serdiuk, Nataliia Stelmakh, “Detection and elimination of noise in low-dose lung computed tomography using neural network methods”, «ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи», Київ, Україна, 15 трав. 2024. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024, С. 170–173.

### **Сердюк О.В., Стельмах Н.В. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ МЕТОДІВ РЕКОНСТРУКЦІЇ ТА МАТЕМАТИЧНОГО ОПИСУ КТ ЗОБРАЖЕНЬ**

Комп'ютерна томографія є одним з основних інструментів у медичній діагностиці, що дозволяє отримувати детальні зображення внутрішніх структур тіла. Завдяки своїй здатності візуалізувати органи, тканини і кістки з високою роздільною здатністю, КТ відіграє критичну роль у виявленні та моніторингу різних захворювань, включаючи рак, серцево-судинні хвороби та травми. Тому

вдосконалення методів реконструкції зображень у КТ є важливим напрямком наукових досліджень, що сприяє підвищенню ефективності діагностики та лікування пацієнтів. В роботі проаналізовано останні дослідження з математичного моделювання реконструкції зображень комп'ютерної томографії (КТ), що вказують на значний прогрес у використанні методів глибокого машинного навчання та інших вдосконалених алгоритмів. Ці дослідження підкреслюють важливість інтердисциплінарного підходу, поєднуючи математичне моделювання, машинне навчання та медичну фізику для покращення методів КТ-реконструкції. Це сприяє підвищенню ефективності діагностики та лікування пацієнтів, забезпечуючи більш точні та якісні зображення з меншою дозою опромінення.

У роботі розглядається проблематика покращення якості реконструкції зображень комп'ютерної томографії (КТ) за допомогою сучасних математичних методів і різних алгоритмів реконструкції. Це дозволяє значно покращити якість зображення за рахунок поступового уточнення реконструкції, що дозволяє підвищити діагностичну точність, зменшити шум та артефакти. Було проаналізовано методи для реконструкції та математичного опису.

В результаті аналізу було визначено, що найбільш ефективно застосування набули ітеративні методів, такі як метод максимальної правдоподібності, *Veo*, та алгебраїчна реконструкція. Ітеративні методи особливо корисні у складних випадках, коли класичні методи не можуть забезпечити достатню якість реконструкції. Досить успішно представлені гібридні методи, що поєднують переваги класичних та ітеративних методів які адаптовані до специфічних низькодозових умов сканування пацієнта.

**Ключові слова:** КТ зображення, математичний опис КТ зображення, цифрова обробка КТ зображень, покращення достовірності інтерпретації, реконструкція, автоматизація розпізнавання КТ зображень.

**Сіданченко В.В.**

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

## ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ ПРОГНОЗУ ЧАСОВИХ РЯДІВ ДАНИХ ПРО ХІМІЧНИЙ СКЛАД ЧАВУНУ НА ВИПУСКУ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ

*Забезпечення виробництва чавуну з заданим хімічним складом має вирішальне значення для якості металургійної продукції та ключових економічних показників металургійного виробництва. Для досягнення цієї мети критично важливо розробити та впровадити ефективні методи прогнозування, які відіграють ключову роль у керуванні процесом виплавки чавуну заданої якості. Складні технологічні процеси, такі як доменна плавка, залежать від багатьох факторів різної природи, що впливають як на загальний перебіг процесу, так і на його окремі характеристики.*

*У процесі дослідження особлива увага приділялась ключовим аспектам обробки даних про хімічний склад чавуну та методам описової статистики. Головна мета описової статистики полягає у представленні інформації про досліджувані дані у зрозумілій та компактній формі. Однак перед тим, як перейти до опису доступних даних, необхідно проаналізувати їх тип та розподіл, оскільки це впливає на вибір методів обробки та опису даних. Також це важливо для вибору відповідного статистичного методу для перевірки гіпотез.*

*Наукова новизна даного дослідження полягає в тому, що дослідники ще не досягли консенсусу щодо закону розподілу даних про хімічний склад чавуну на випуску, через що виникають сумніви в обґрунтованості існуючих методів прогнозу даних про хімічний склад чавуну на випуску. Крім того, наразі існує не так багато наукових публікацій, які детально розглядали б цю тему. У зв'язку з цим виникає потреба в проведенні дослідження стохастичних властивостей реальних даних про хімічний склад чавуну на випуску, а разом з тим, вибір алгоритмів прогнозування даних часових рядів про хімічний склад чавуну на випуску доменної печі, адекватних до властивостей процесу. Такі дослідження сприятимуть зростанню якості та ефективності виробництва чавуну, що є важливим аспектом для підвищення конкурентоспроможності підприємства на ринку.*

**Ключові слова:** *типи даних, закон розподілу, описова статистика, нестационарні процеси, цифрові фільтри, нейронні мережі.*

**Постановка проблеми.** У сучасній металургії, розвиток технологій виробництва чавуну створює потребу в підвищенні якості продукції та оптимізації виробничих процесів. Контроль і забезпечення потрібного хімічного складу чавуну на випуску доменної печі є ключовим аспектом цього процесу. Проте, це завдання ускладнене через специфічні особливості процесу, велику кількість залежних факторів, інерційність та перешкоди. Дослідження характеристик часових рядів, що відображають результати хімічного аналізу чавуну, необхідні для розробки методів прогнозування хімічного складу чавуну з урахуванням умов сучасного виробництва.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** До теперішнього часу вважалося [1], що часові ряди, які відображають хімічний склад чавуну на випуску, мають гауссівські властивості. На цій основі розроблялися методи оцінки та прогнозування цих даних.

**Постановка завдання.** Метою цієї роботи є обґрунтування методу прогнозу часових рядів

які представляють данні про хімічний склад чавуну на випуску доменної печі, з урахуванням стохастичних та динамічних властивостей часових рядів.

**Виклад основного матеріалу.** До характерних особливостей доменного виробництва належать: 1) випадковий характер змін у часі фізичних та хімічних властивостей шихтових матеріалів; 2) велика кількість чинників (зокрема неконтрольованих), які впливають на кінцевий результат доменної плавки.

Виникає необхідність проведення досліджень властивостей часових рядів, якими представлені результати хімічного аналізу чавуну на випуску.

Щоб дослідити сигнал, нами було взято базу реальних показників хімічного аналізу чавуну на випуску доменної печі № 3 (ДП-3) Маріупольського металургійного комбінату ім. Ілліча.

Як правило, часовими рядами є випадкові зміни величин, що дозволяють послідовно уявити еволюцію складних систем на основі отриманих даних [2]. Такий аналіз зводиться до обчислення

кореляційних функцій векторів станів часових послідовностей величин, що характеризують систему. Найбільш поширені методи використовують кореляційний та спектральний аналізи, згладжування та фільтрацію даних, моделі авторегресії та прогнозування [3; 4].

На першому етапі дослідження було проведено тест Колмогорова – Смирнова для досліджуваних часових рядів даних про вміст кремнію в чавуні на випуску доменної печі [5]. Отримані рівні значущості склали  $p = 0,00012$  і  $p = 0,00004$  для часових рядів 1 і 2, дозволяють відкинути гіпотезу про відповідність даних, закону нормального розподілу, оскільки критичне значення рівня значущості становить 0,05.

До аналогічного висновку можна дійти на підставі результату візуального аналізу гістограми (рис. 1), де помітні суттєві відхилення від нормального розподілу.

Більш чітку картину дає квантильна діаграма, на якій чітко видно істотне відхилення від лінії нормального розподілу (червона пунктирна лінія), (рис. 2) [6].

З огляду на, отримані результати дослідження, можна дійти висновку, що дані хімічного аналізу чавуну на виході доменної печі, не підпорядковуються нормальному закону розподілу, отже, традиційні підходи до оцінки та прогнозу хімічного складу чавуну на виході є не обґрунтованими і відповідно не можуть дати надійних результатів [7].

Виникає необхідність проведення дослідження властивостей часових рядів якими представлені результати хімічного аналізу на випуску ДП із застосування методів фрактального аналізу [8].

Однією з основних властивостей фрактального (самоподібного) процесу є повільне зменшення автокореляційної функції (АКФ) [9].

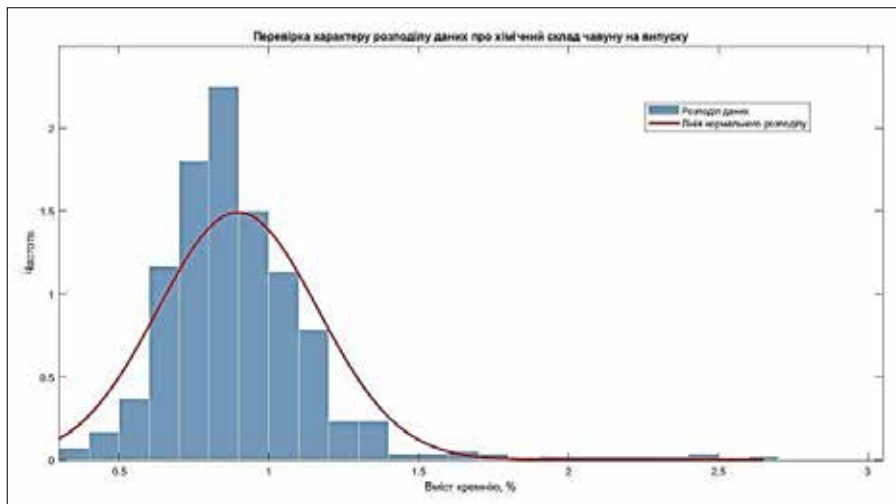


Рис. 1. Гістограма розподілу даних

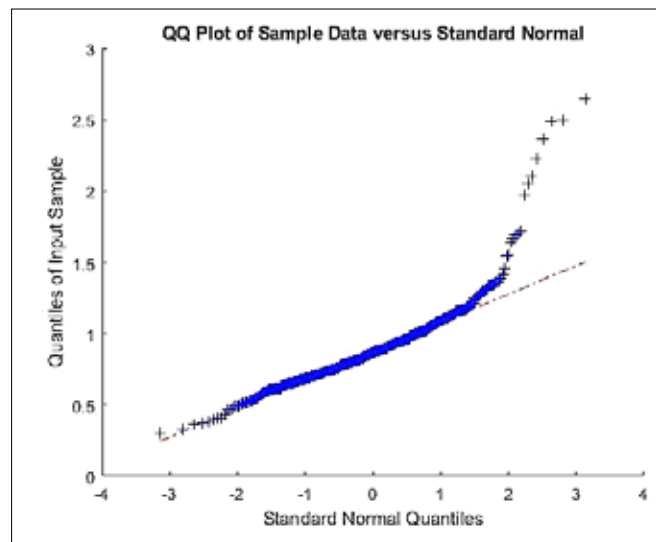


Рис. 2. Квантильна діаграма досліджуваного часового ряду

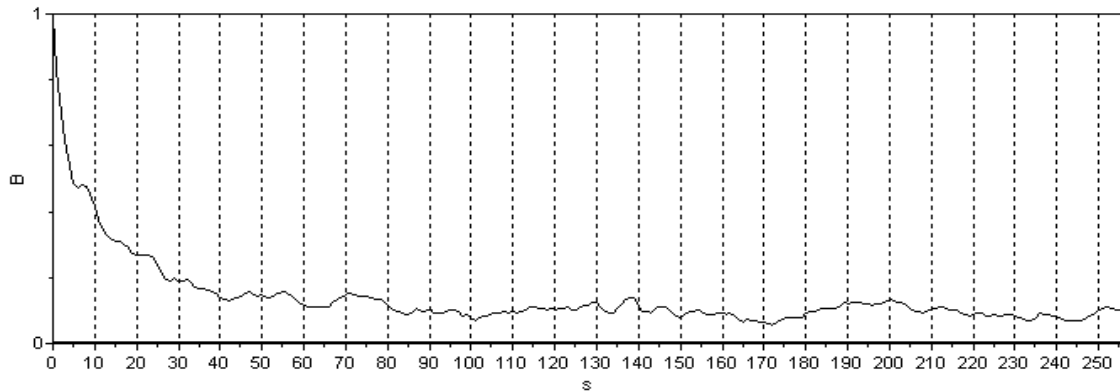


Рис. 3. АКФ досліджуваного часового ряду

З рисунка 3 видно, що АКФ має повільно спадаючий характер, а в «хвості» відсутня тенденція прагнення до нуля. Така поведінка АКФ є характерною для самоподібних процесів [10].

Основна кількісна характеристика фракталів – топологічна розмірність  $D$ , запроваджена Хаусдорфом. Для більшості природних часових рядів аналітичне знаходження топологічної фрактальної розмірності неможливе, тому  $D$  визначають чисельно: або у вигляді кореляційної оцінки, або через величини, пов'язані з нею простими співвідношеннями (наприклад, через показник Херста  $H$ ). Для калібрування часових вимірів Херст ввів безрозмірне відношення. Цей спосіб аналізу стали називати методом нормованого розмаху або  $R/S$  – аналізом [11].

Розрахункові значення показника Херста для досліджуваного часового ряду склали  $H = 0,6189 \pm 0,1261$ , що також підтверджує самоподібний характер процесів.

Таким чином встановлено, що досліджувані часові ряди носять фрактальний характер і мають властивість самоподібності. Отже, подальше дослідження необхідно проводити з використанням фрактальних методів і методів стохастичної динаміки, які адекватні характеру досліджуваних процесів.

Для виявлення закономірностей, пов'язаних з динамікою системи, необхідний детальний аналіз геометричного образу динамічного режиму – атрактора, що є так званим притягуючим безліччю траєкторій системи в  $D$  – мірному фазовому (або псевдофазовому) просторі. Кожному типу динамічної поведінки відповідає власний атрактор і, звісно, його геометричний образ – фазовий портрет [12]. Наприклад, динаміки звичайної хімічної реакції відповідає атрактор типу стійкої точки. Регулярним коливанням відповідає стійкий граничний цикл. Цим класичним атракторам відповідають класичні геометричні області: точка,

замкнута крива (коло, еліпс тощо) або поверхня у формі тора. На противагу цьому, неупорядковані траєкторії фазового портрета вказують на наявність хаотичного атрактора. До цього класу атракторів відноситься і так званий дивний атрактор, геометричним образом якого у фазовому просторі є фрактальний об'єкт.

Вигляд дивного атрактора для досліджуваного часового ряду у нормованих координатних осях наведено на рисунку 4. Тут чітко видно область тяжіння, що є щільним «ядром». У той самий час для випадкової послідовності, як зазначалося вище, точки відновленого псевдоатрактора утворюють безструктурну хмару в лаговому просторі [10].

На основі досліджуваного часового ряду можна побудувати кореляційну ентропію  $K$ , яка показує ступінь розбігання близьких фазових траєкторій та дозволяє оцінити кількість інформації, необхідної для прогнозу поведінки процесу в майбутньому.

Кореляційна ентропія не зростає, що свідчить про наявність хаотичної складової. Величина  $K$  достатня мала ( $K = 0,636$ ), що визначає хорошу трендостійкість і передбачуваність процесу на 4–6 кроків уперед.

Одна з основних і найінформативніших характеристик хаотичних процесів кореляційна розмірність відновленого атрактора  $D$  показує ступінь складності системи, що породжує процес [13; 14]. Відомо, що кореляційна розмірність більше п'яти передбачає істотний вплив випадкових складових. Отримані характеристики досліджуваного процесу наведені в таблиці 1, дозволяють стверджувати, що часові послідовності, які вивчаються, характеризуються наявністю внутрішнього порядку, який визначається як фрактальний, а часова еволюція досліджуваної системи являє собою стійкий стан званий – дивним атрактором.



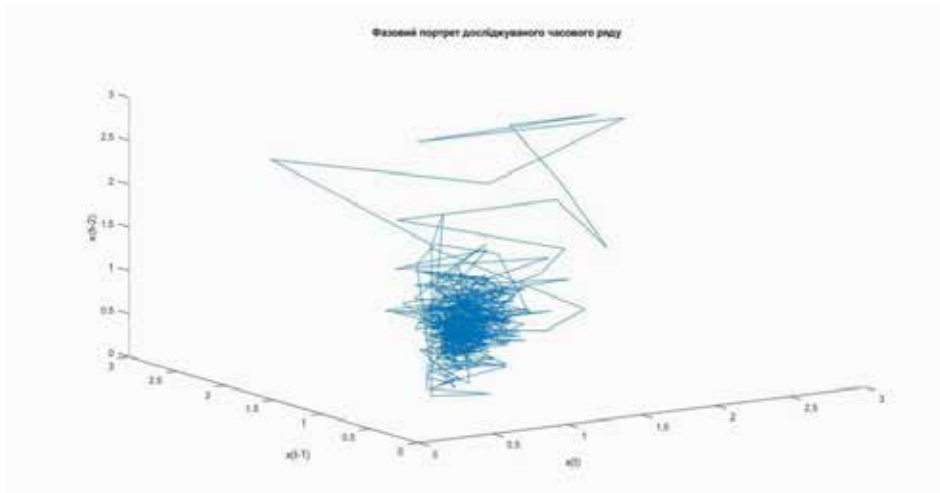


Рис. 4. Фазовий портрет дивного атрактора

Таблиця 1  
Дані про динаміку хімічного аналізу чавуну на випуску

|                              |                     |
|------------------------------|---------------------|
| Показник Херста, $H$         | $0,6189 \pm 0,1261$ |
| Фрактальна розмірність, $d$  | $1,3811 \pm 0,1261$ |
| Кореляційна ентропія, $K$    | 0,636               |
| Кореляційна розмірність, $D$ | 9,876               |

З огляду на отримані результати аналізу часових рядів, можна стверджувати, що традиційні методи прогнозування, засновані на гауссівському характері досліджуваних часових рядів, не забезпечують необхідної точності та достовірності, оскільки не адекватні характеру досліджуваних процесів. Тому для прогнозування цих часових рядів варто використовувати методи, що найбільш адекватні характеру процесу [15].

Особливе місце у задачі оцінки та прогнозування хімічного складу чавуну займають цифрові фільтри. Оскільки моделі часових рядів використовуються успішно протягом багатьох років, важливо вивчити ефективність цифрових фільтрів у цьому контексті та їх потенційний внесок у побудову прогнозів.

На рисунку 5 показано прогноз відсоткового вмісту кремнію у чавуні КІХ – фільтром (фільтр з кінцевою імпульсною характеристикою, або finite impulse response, FIR) в системі MatLab. Була використана вбудована функція (пряма реалізація фільтра, Direct Form FIR). Фільтри КІХ мають лінійну фазову характеристику і мають властивість кінцевої імпульсної характеристики, що робить їх більш стійкими до прогнозування майбутніх значень часового ряду. Вони зазвичай простіші в налаштуванні і мають меншу обчислювальну складність.

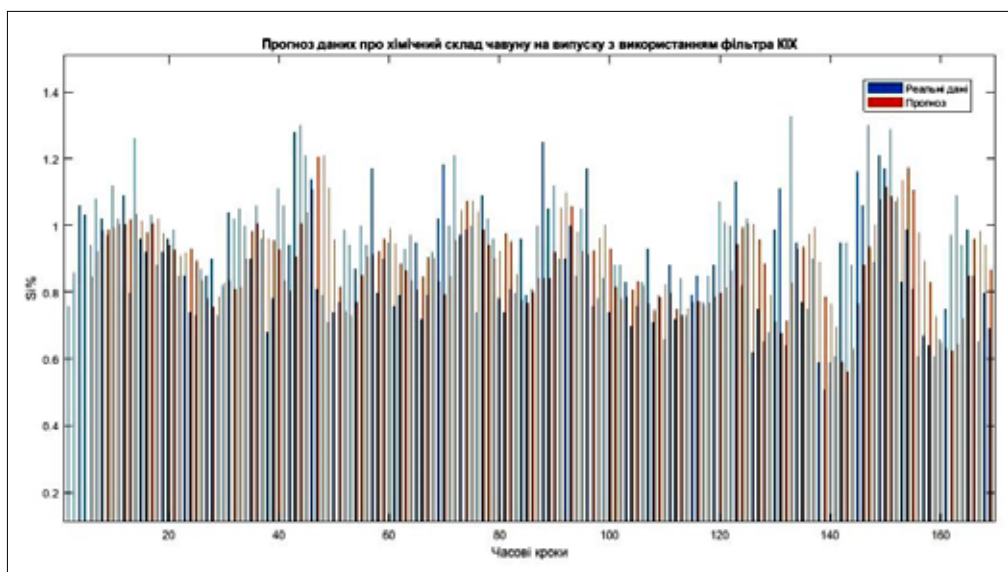


Рис. 5. Прогноз відсоткового вмісту кремнію у чавуні з використанням КІХ фільтра

Результати роботи КІХ фільтра проілюстровані на рисунку 5, та представленні у таблиці 2. Усереднена відносна помилка прогнозу відсоткового вмісту кремнію (Si) у чавуні КІХ фільтром склала: 7,2 %.

Таблиця 2  
Реальні значення відсоткового вмісту кремнію у чавуні, та прогнозні значення отримані за допомогою КІХ фільтра

| Реальні значення Si, % | Прогнозні |
|------------------------|-----------|
| 0,92                   | 0,85      |
| 0,76                   | 0,71      |
| 0,86                   | 0,80      |
| 1,06                   | 0,99      |
| 1,03                   | 0,96      |
| 0,94                   | 0,87      |
| 1,08                   | 1,01      |
| 1,02                   | 0,95      |
| 0,97                   | 0,90      |
| 1,12                   | 0,92      |

Беручи до уваги отримані результати прогнозу з використанням КІХ фільтра та значення усередненої відносної помилки прогнозу, можна зрозуміти що КІХ фільтр не є найкращим інструментом для прогнозування суттєво нелінійних часових рядів, оскільки ці фільтри мають лінійну природу, та можуть добре обробляти лінійні системи та часові ряди з лінійною залежністю між значеннями. Однак для прогнозування суттєво нелінійних часових рядів, таких як ті, які можуть мати хаотичну або фрактальну структуру, КІХ фільтри можуть виявитися неефективними.

Причина полягає в тому, що нелінійні ряди можуть містити складні, нелінійні закономірності та залежності, які не можуть бути адекватно описані лінійними моделями.

Для більш ефективного прогнозування нелінійних часових рядів часто застосовуються методи на основі нейронних та нейронечітких мереж, які краще здатні враховувати складні нелінійні закономірності даних.

Принцип роботи подібних алгоритмів ґрунтується на використанні спеціальних моделей машинного навчання. На початку роботи алгоритму вхідні дані аналізуються і піддаються попередній обробці, включаючи видалення викидів, масштабування і т. д. Дані поділяються на навчальний та тестовий набори. Для прогнозування часового ряду створюється структура нейронної мережі. Це може бути, проста нейронна мережа прямого поширення (feed forward neural network) або рекурентна нейронна мережа (recurrent neural network), яка може враховувати залежність у часі.

Нейронна мережа навчається на наборі даних з використанням методів оптимізації, таких як стохастичний градієнтний спуск. У процесі навчання модель підлаштовує свої ваги та параметри таким чином, щоб мінімізувати помилку між прогнозованими та реальними значеннями часового ряду. Після закінчення навчання нейронна мережа використовується для прогнозування значень часового ряду на тестовому наборі даних. Модель робить прогнози з урахуванням вхідних даних, і порівнює їх із реальними значеннями.

Після прогнозування значень часового ряду відбувається оцінка продуктивності моделі, наприклад шляхом обчислення різних метрик продуктивності.

Нами було встановлено 10 прихованих нейронів. Цей параметр визначає кількість нейронів у прихованому шарі нейронної мережі.

Використовувався метод оптимізації, вбудований у функцію “train” для навчання нейронної мережі. Цей метод оптимізації зазвичай ґрунтується на стохастичному градієнтному спуску або його модифікаціях.

На рисунках 6–9 та в таблиці 3 представлені результати прогнозування з використанням нейронної мережі.

Графік регресії навчання нейронної мережі (рис. 6) (Neural Network Training Regression), дозволяє візуально порівняти реальні значення та прогнозні значення, отримані в процесі навчання нейронної мережі.

Кожна точка на графіку представляє пару реального та прогнозного значення. Якщо модель правильно передбачає значення, точки будуть лежати близько до лінії  $y = x$  (діагональної лінії). Розкид точок навколо лінії  $y = x$  дозволяє оцінити різні аспекти продуктивності моделі, такі як точність передбачень та ступінь дисперсії помилок. Варто звертати увагу на значні відхилення або викиди, які можуть свідчити про те, що модель погано навчена або що в даних є аномалії.

Графік найкращої валідаційної продуктивності нейронної мережі (рис. 7) відображає, як продуктивність нейронної мережі змінюється в процесі навчання на тренувальних даних та перевірки на валідаційних даних.

Якщо лінії максимально наблизилися одна до одної, при цьому їх значення залишаються низькими, це вказує на те, що модель добре навчена.

Графік гистограми помилок навчання нейронної мережі (рис. 8) (Neural Network Training Error Histogram) є розподілом помилок моделі на тренувальних даних.

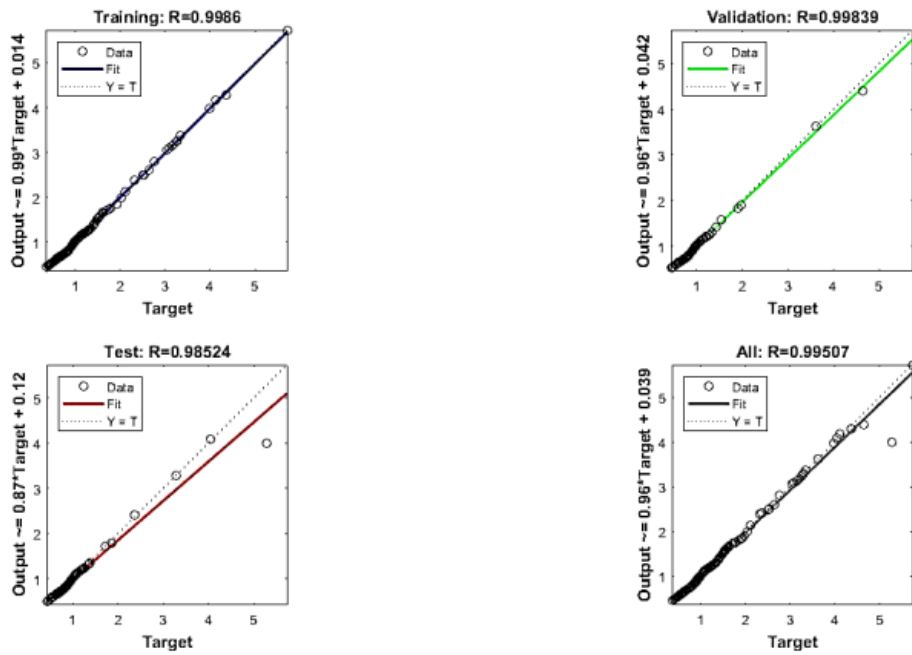


Рис. 6. Графік регресії навчання нейронної мережі

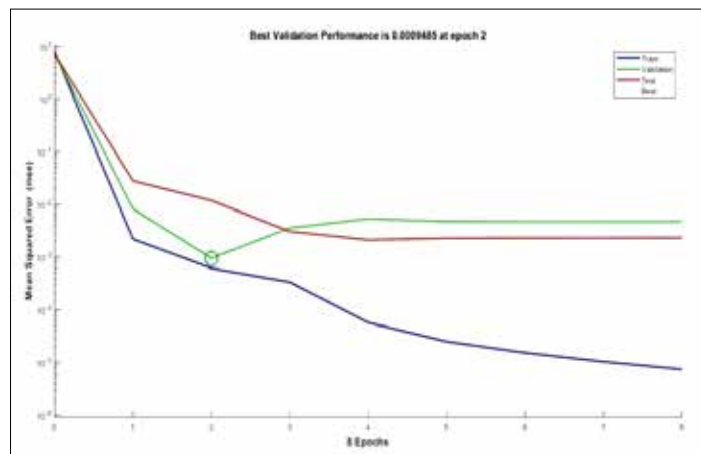


Рис. 7. Графік найкращої валідаційної продуктивності нейронної мережі

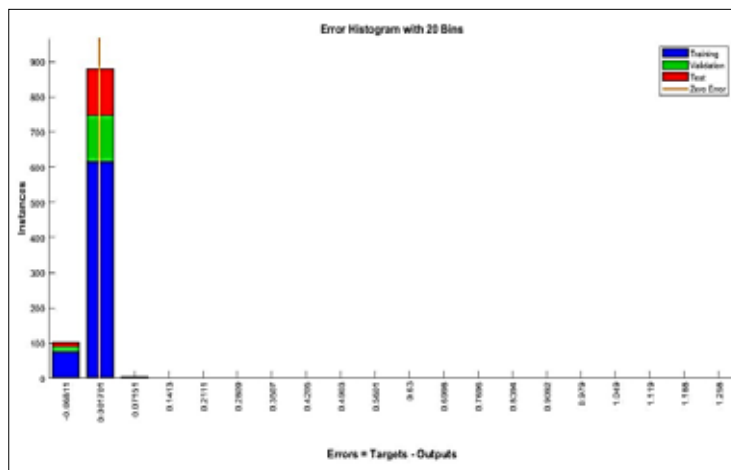


Рис. 8. Гістограми помилок навчання нейронної мережі

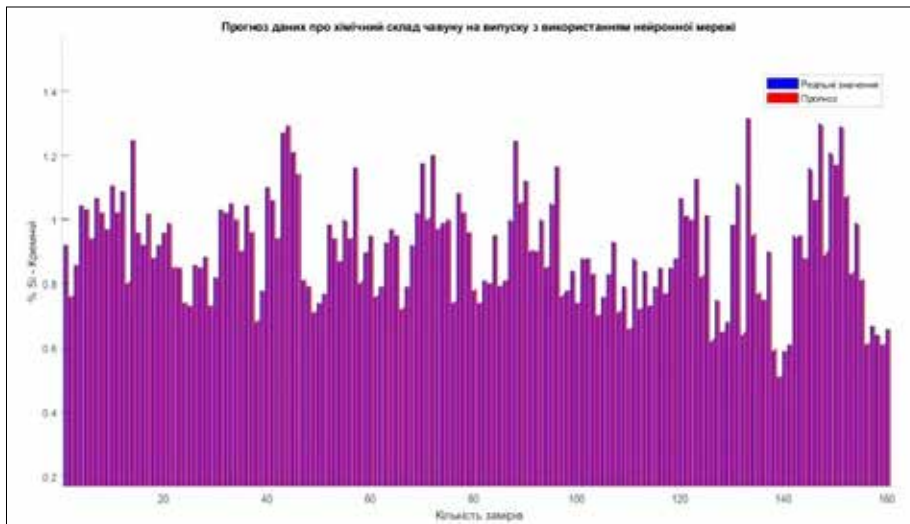


Рис. 9. Прогноз відсоткового вмісту кремнію у чавуні з використанням нейромережевого алгоритму

Гістограма дозволяє візуально оцінити розподіл помилок моделі на тренувальних даних. Якщо розподіл зосереджено навколо нульової помилки або близько до неї, це вказує на те, що модель добре справляється з тренувальними даними.

На рисунку 9 представлена гістограма що ілюструє прогноз відсоткового вмісту кремнію (Si) у чавуні, реалізований за допомогою нейромережевого алгоритму. Порівняння реальних і прогнозних значень представлені у таблиці 3. Усереднена відносна помилка прогнозу склала: 0,007 %.

Таблиця 3  
Реальні значення відсоткового вмісту кремнію у чавуні, та прогнозні значення отримані за допомогою нейромережевого алгоритму

| Реальні значення Si, % | Прогнозні |
|------------------------|-----------|
| 0,92                   | 0,919936  |
| 0,76                   | 0,769872  |
| 0,86                   | 0,859792  |
| 1,06                   | 1,059608  |
| 1,03                   | 1,029791  |
| 0,94                   | 0,939832  |
| 1,08                   | 1,079824  |
| 1,02                   | 1,019864  |
| 0,97                   | 0,969888  |
| 1,12                   | 1,119848  |

Як видно з отриманих результатів прогнозу, нейромережні алгоритми є потужним інструментом для прогнозування нелінійних часових рядів. По-перше, нейронні мережі гнучкі і можуть виявляти складні та нелінійні закономірності в даних, що дозволяє їм ефективно моделювати різноманітні часові ряди зі змінною структурою та динамікою. Також варто відзначити, що нейронні

мережі можуть працювати з великими обсягами даних та забезпечувати високу точність прогнозування за наявності достатньої кількості навчальних даних.

Однак, у нейромережевих алгоритмів також є свої недоліки. По-перше, нейронні мережі схильні до перенавчання. Це може призвести до того, що модель занадто точно буде підлаштовуватися під навчальні дані і втрачати здатність до узагальнення на нові дані. Крім того, досить складний алгоритм прогнозу, що вимагає великих часових витрат, не дозволяє застосовувати даний підхід у режимі реального часу.

З урахуванням переваг та недоліків попередніх методів оцінки та прогнозу часових рядів, що представляють дані про хімічний аналіз, було запропоновано алгоритм, який ґрунтується на модифікації процедури калманівської фільтрації.

Відомо, що рівняння фільтра Калмана можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned} \hat{X}_n &= F_n \hat{X}_{n-1} + K_n [S_n - H_n F_n X_{n-1}] \\ K_n &= A_n H_n^T [H_n A_n H_n^T + R]^{-1} \\ A_n &= F_n P_{n-1} F_n^T \\ P_n &= A_n - K_n H_n A_n. \end{aligned} \quad (1)$$

де  $\hat{X}_n$  – оціночний вектор стану;  $F_n$  – матриця переходу зі стану  $n - 1$  в  $n$ ;  $K_n$  – коефіцієнт підсилення фільтра Калман (ФК);  $S_n$  – вимірне значення сигналу;  $P_n$  – матриця коваріації станів;  $H_n$  – матриця умов вимірювання. Індекс «Т» означає транспонування матриці.

Рівняння (1) можна застосовувати для отримання оцінки, якщо матриця переходу  $F_n$  відома.

На практиці, як правило, аналітичний вираз для сигналу, що оцінюється, невідомий, тому нами запропонована наступна модифікація ФК.

Відомо, що сигнал довільної форми можна подати у вигляді розкладання в ряд, наприклад, ряд Тейлора. Обмежившись членами не вище  $m$  порядку, для кожного елемента матриці  $F$  можна записати:

$$F_{ij} = \begin{cases} \frac{j!}{i!(j-i)!} - (j-i), & 0 \leq i \leq m, i \leq j \leq m, \\ 0, & j < i. \end{cases} \quad (2)$$

Розбіжність фільтра Калмана, пов'язана, переважно, з кінцевим значенням  $m$ , контролювалася підрахунком статистики:

$$B_M = \sum_{l=1}^M b_l, \quad B_0 = 0, \quad l = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

$$b_l = \text{sgn}(S_l - \hat{X}_l) = \begin{cases} +1, & S_l - \hat{X}_l \geq 0 \\ -1, & S_l - X_l < 0 \end{cases} \quad (4)$$

У разі виконання умови  $B_m = h$ , де  $h$  – порогове значення суми (3), приймається рішення про розлад і процес триває з моменту  $n - h$  с початковими параметрами для (1).

Для реалізації процедури прогнозу достатньо в (1) ввести  $H_n = [000]$ , а індекс  $n$  представити як  $n = n + k$ , де  $k$  – кількість заздалегідь заданих кроків.

Результати роботи алгоритму представлені на рисунку 10, де стовпчаста діаграма відображає реальні значення вмісту кремнію у чавуні (синій колір) і прогнозу (червоний колір).

З рисунка 11, який ілюструє розподіл помилки прогнозу модифікованого алгоритму фільтра Калмана, можна помітити що висота стовпців гістограм зменшується експоненційно (тобто має місце експоненційно спадаючий тренд). Це вказує на те, що існує більш висока концентрація вимірювань із меншими відносними помилками та значно менша кількість вимірювань із більшими відносними помилками [16].

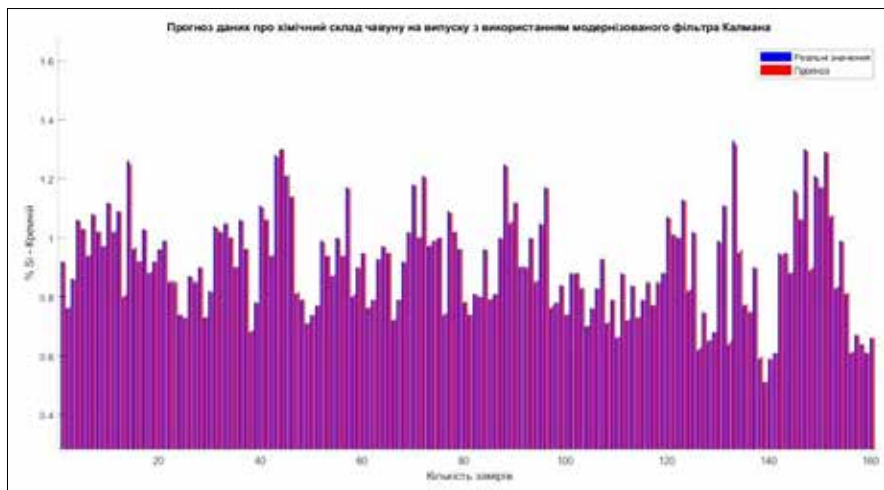


Рис. 10. Прогноз відсоткового вмісту кремнію у чавуні з використанням модифікованого алгоритму фільтра Калмана

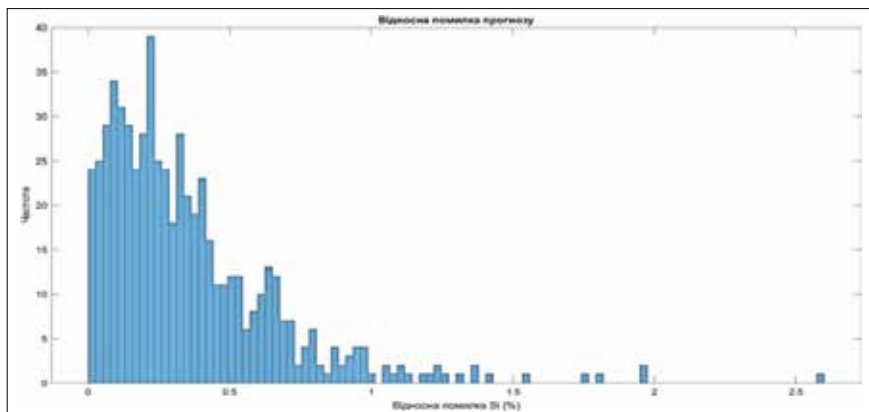


Рис. 11. Гістограма розподілу помилки прогнозу відсоткового вмісту кремнію у чавуні, з використанням модифікованого алгоритму фільтра Калмана

У таблиці 4 представлені реальні значення відсоткового вмісту кремнію у чавуні, та прогнозні значення отримані за допомогою модифікованого алгоритму Калманівської фільтрації, усереднена відносна помилка якого склала: 0,17 %.

Таблиця 4  
**Реальні значення відсоткового вмісту кремнію у чавуні, та прогнозні значення отримані за допомогою модифікованого алгоритму фільтра Калмана**

| Реальні значення Si, % | Прогнозні |
|------------------------|-----------|
| 0,92                   | 0,921524  |
| 0,76                   | 0,761032  |
| 0,86                   | 0,861442  |
| 1,06                   | 1,061912  |
| 1,03                   | 1,031751  |
| 0,94                   | 0,941598  |
| 1,08                   | 1,081136  |
| 1,02                   | 1,020334  |
| 0,97                   | 0,971349  |
| 1,12                   | 1,121504  |

**Висновки.** У роботі були проведені дослідження властивостей часових рядів, якими представлені результати хімічного аналізу чавуну на

випуску. У процесі дослідження було висунуто та підтверджено гіпотезу про фракталіні (самоподібні) властивості досліджуваних часових рядів, відповідно до цього був зроблений висновок, що традиційні методи прогнозування неадекватні характеру досліджуваних процесів.

Як рішення поставлених завдань, автором запропоновано модифікований алгоритм фільтра Калмана, працюючий у реальному масштабі часу. Цей метод є розширенням класичного фільтра Калмана та являє собою субоптимальний процес фільтрації та прогнозу. У контексті металургійної промисловості модифікований фільтр Калмана може застосовуватися для прогнозування та корекції хімічного складу чавуну на основі раніше отриманих даних про хімічний склад на випуску доменної печі. Переваги модифікованого фільтра Калмана у цій задачі включають його здатність врахувати шум та невизначеність у даних, а також забезпечити точні та стабільні прогнози навіть за наявності систематичних помилок. Це особливо важливо в металургійній промисловості, де точність контролю хімічного складу чавуну має вирішальне значення для якості та економічної ефективності виробництва.

#### Список літератури:

1. Миронова Т. М. Застосування кількісного аналізу для дослідження впливу модифікування на первинну структуру до евтектичних білих чавунів. *Системні технології*. 2014. № 5. С. 157–162.
2. Boffetta G., Sencini M., Falconi M., Vulpiani A. Predictability: a way to characterize complexity. *Physics reports*. 2002. № 356 (6). P. 367–374.
3. Єременко В. С., Куц Ю. В., Мокійчук В. М., Самойліченко О. В. Статистичний аналіз даних вимірювань. Київ, 2013. 320 с.
4. Kornienko V.I., Gerasina A.V., Gusev A.Yu. Methods and principles of control over the complex objects of mining and metallurgical production. *Energy Efficiency Improvement of Geotechnical Systems*, Taylor & Francis Group. London, 2013. P. 183–192.
5. Солошенко О. М. Вдосконалені методи розрахунку статистики Колмогорова – Смирнова, ваги категорії змінної та значення інформації у кредитному рейтингу. *System research and information technologies*. 2015. № 4. С. 104–113.
6. Малярець Л. М., Денисюк О.В. Аналіз соціально-економічних даних : методичні рекомендації до самостійної роботи для здобувачів спеціальності 051 «Економіка» третього (освітньо-наукового) рівня. Харків, 2021.
7. Сіданченко В. В. Перевірка характеру розподілу даних про хімічний склад чавуну на випуску. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*. 2023. № 3. С. 65–69.
8. Булах В. А. Інформаційна технологія класифікації впорядкованих масивів даних із фрактальними властивостями методами машинного навчання : дис. / Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Харків, 2021. С. 142.
9. Будкова Л. В., Корнієнко В.І. Моделювання самоподібного трафіка в інформаційних телекомунікаційних мережах. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2013. № 4. С. 46–52.
10. Гусєв О., Сіданченко В. Фрактальний аналіз реальних даних про хімічний склад чавуну на випуску доменної печі. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*. 2022. № 2. С. 24–31.
11. Feder J. Fractals. *Department of Physics University of Oslo*. 1988. P. 282.

12. Русин В. Б. Моделювання методів управління динамічним хаосом та їх практичне застосування : автореферат. дис. ... кандидата технічних наук : 01.05.02. Чернівці, 2017. С. 147.
13. Заїка В. І., Кишенько В. Д. Застосування апарату нелінійного аналізу динамічних систем для обробки історичних даних роботи станції дефекосатурації. *Харчова промисловість*. 2010. № 9. С. 159–163.
14. Смітюх Я. В., Кишенько В. Д. Відновлення та оцінка атрактора на основі часових рядів роботи брагоректифікаційної установки. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2006. № 3. С. 55–57.
15. Сіданченко В.В., Нікольська О.І. Методи нелінійної динаміки в задачі прогнозування хімічного складу чавуну на випуску. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*. 2023. №. 2. С. 76–83. DOI: <https://doi.org/10.32782/IT/2023-2-9>
16. Mamuzic I., Gusev O. Yu., Sidanchenko V. V. Fractal analysis in the problem of predicting the chemical composition of cast iron. *17th International Symposium of Croatia Metallurgical Society – SHMD 2024, Materials and metallurgy: supplment of the Book of abstracts*. (Zagreb, 18.04.2024-19.04.2024). Zagreb, 2024. P. 313. URL: CroRIS – CROSBİ

**Sidanchenko V.V. JUSTIFICATION OF THE METHOD FOR FORECASTING TIME SERIES DATA ON THE CHEMICAL COMPOSITION OF CAST IRON AT THE OUTLET OF A BLAST FURNACE**

*Ensuring the production of cast iron with a specified chemical composition is crucial for the quality of metallurgical products and key economic indicators of metallurgical production. To achieve this goal, it is critically important to develop and implement effective forecasting methods, which play a key role in managing the process of smelting cast iron of a specified quality. Complex technological processes, such as blast furnace smelting, depend on many factors of different natures that affect both the overall course of the process and its individual characteristics.*

*In the course of the research, special attention was paid to key aspects of processing data on the chemical composition of cast iron and descriptive statistical methods. The main goal of descriptive statistics is to present information about the investigated data in a understandable and compact form. However, before describing the available data, it is necessary to analyze their type and distribution, as this affects the choice of data processing and description methods. This is also important for choosing the appropriate statistical method to test hypotheses.*

*The scientific novelty of this study lies in the fact that researchers have not yet reached a consensus on the distribution law of data on the chemical composition of cast iron for production, which raises doubts about the validity of existing methods for forecasting data on the chemical composition of cast iron for production. In addition, there are currently not so many scientific publications that have thoroughly examined this topic. Therefore, there is a need to study the stochastic properties of real data on the chemical composition of iron for production, as well as the selection of forecasting algorithms for time series data on the chemical composition of cast iron for blast furnace production, adequate to the properties of the process. Such studies will contribute to the improvement of the quality and efficiency of cast iron production, which is an important aspect for increasing the competitiveness of the enterprise in the market.*

**Key words:** data types, distribution law, descriptive statistics, non-stationary processes, digital filters, neural networks.

*Сітайло М.С.*

Державний університет «Житомирська політехніка»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗБОРУ ДАНИХ З МЕТОЮ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ ПРИ ПРОГНОЗУВАННІ КУРСУ КРИПТОВАЛЮТ

*Засоби на основі штучного інтелекту продовжують стрімко здобувати популярність у різноманітних галузях та знаходити варіанти використання при вирішенні певних практичних завдань. Незважаючи на широкий спектр задач, які можуть розв'язуватися згаданим інструментом, процес розробки нейронних мереж складається з визначених етапів, які є подібними для майже усіх задач. Збір даних є важливим етапом при розробці рішення з використанням штучного інтелекту. Об'єм і варіативність створеного датасету мають значний вплив на ефективність розробленої нейронної мережі. Хоч процес збору даних складається з певних визначених етапів, особливості поставленого завдання часто вимагають додаткових операцій. Прогнозування вартості активів є актуальним завданням впродовж значного періоду часу. Це сприяє активному пошуку різноманітних методів, які здатні покращити результати прогнозування. Хоч дане завдання є досить подібним до передбачення ціни інших видів активів, особливості технології блокчейн зумовлюють певні особливості під час його вирішення. Доступ до даних блокчейну дозволяє отримувати інформацію про усі операції з певними криптовалютами або токенами, що дозволяє враховувати ці фактори при проведенні фундаментального аналізу.*

*Дана стаття містить аналіз актуальних досліджень, які стосуються аналізу різних видів даних, що можуть бути використані при прогнозуванні котирувань криптоактивів. На основі проведеного аналізу було визначено особливості роботи з основними категоріями джерел даних, які застосовуються для технічного, фундаментального та соціально-економічного аналізів. Також були проведені опис та проектування процесу збору та обробки даних з криптобірж, блокчейнів та соціальних мереж. Проведений аналіз дозволив провести практичне дослідження процесу збору даних для прогнозування вартості криптовалют. Це полягло у ознайомленні з різноманітними вебресурсами або програмними засобами, які можна застосовувати при вирішенні поставленого завдання. На основі отриманих результатів, було проведено опис процесу взаємодії з криптобіржами, блокчейнами та даними соціальних мереж з метою збору усіх розглянутих категорій даних. Цей процес базується на використанні прикладних програмних інтерфейсів, бібліотек для взаємодії з блокчейнами та бібліотек для аналізу природних мов для оцінки емоційного забарвлення повідомлень у певних соціальних мережах.*

**Ключові слова:** збір та обробка даних, криптовалюти, набір даних, соціально-економічний аналіз, технічний аналіз, фундаментальний аналіз.

**Постановка проблеми.** Актуальність проблеми прогнозування вартості активів, особливо криптовалют, зумовлює широке використання нейронних мереж для вирішення цього завдання. Проте, ефективність створених мереж тісно пов'язана з наборами даних, які використовуються для їх навчання. Це сприяє широкому дослідженню різноманітних джерел та видів інформація, яка може бути використана для більш ефективного передбачення майбутніх котирувань криптовалют.

Незважаючи на велику кількість наукових робіт присвячених дослідженню різних видів даних, налагодження процесу збору та обробки даних вирішується особисто науковцем, який збирається їх використовувати для навчання власної

нейронної мережі. Так як при прогнозуванні вартості криптовалют зазвичай використовуються досить різноманітні за структурою та особливостями джерела даних, важливим є дослідження процесу реалізації збору та обробки цієї інформації з метою її систематизації та узагальнення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідження методів прогнозування курсу криптовалют та підходів для їх покращення можна умовно поділити на 2 категорії:

- 1) дослідження покращення нейронних мереж за допомогою яких відбувається прогнозування;
- 2) аналіз різних джерел даних та оцінка їх впливу на котирування криптовалют.

На даний момент є велика кількість архітектур нейронних мереж, які застосовуються для



вирішення даного завдання, проте усі вони використовують певні набори даних при навчанні та прогнозуванні. Отже, удосконалення наборів вхідних даних має позитивний вплив на точність результатів прогнозування для майже усіх видів архітектур мереж.

Задача прогнозування вартості активів завжди була актуальною. Це сприяло пошуку методів та інструментів для прогнозування їх вартості. Так як кожний вид активу має свої особливості, задача прогнозування майбутньої ціни розглядається з їх врахуванням. Якщо систематизувати різні види аналізу вартості активів можна виділити 3 групи:

1. Технічний аналіз.
2. Фундаментальний аналіз.
3. Соціально-економічний аналіз.

Зазвичай передбачення курсу криптовалют базується на використанні технічного методу. Він включає в себе аналіз графіків ціни, попиту та індикаторів з використанням відповідних методів технічного аналізу. Значно рідше застосовується фундаментальний аналіз, що насамперед спричинене відсутністю певних фундаментальних індикаторів. Це зумовлене тим, що часто криптоактиви не прив'язані до певних пасивів та не приносять дохід як компанії, отже складно визначити фундаментальну цінність кожного з них. Проте, даний вид цифрових активів має певні характеристики, які можна враховувати при передбаченні їх вартості, а саме дані про їх використання у мережі блокчейн. Так як модель даних цих валют побудована на основі попиту й пропозиції, дані характеристики можуть бути дуже важливими у передбаченні зміни популярності певного активу, що часто корелює з його ціною.

Окрім згаданих типів аналізу криптовалют треба враховувати й безліч сторонніх факторів. Як було зазначено, поточна ціна криптовалют формується відношенням між попитом та пропозицією. Саме ця особливість підкреслює важливість циклів економіки, відношення суспільства до даного виду активів та інших соціально-економічних факторів під час створення прогнозу для даних активів.

Існує велика кількість досліджень, які як розглядають кожний з видів аналізу окремо, так і об'єднують різні методи між собою.

Найбільш поширеним методом прогнозування вартості криптовалют є передбачення котирувань на основі історичних даних зміни ціни. П. Моді та К. Арші у своїй роботі [1] дослідили прогнозування вартості Bitcoin використовуючи історичні дані зміни ціни на графіку Відкриття-Макси-

муму-Мінімуму-Закриття (Open-High-Low-Close, OHLC) графіку. Цей графік дозволяє отримати інформацію про зміну котирувань активу за певний інтервал часу, а саме: ціну відкриття, ціну закриття, найвищу ціну та найнижчу ціну. Публікація Ш. Лю та К. Ву [2] також базується на використанні історичних даних, проте вони додатково обробляють часові ряди за допомогою визначення тренду і сезональності даних, а також застосування функції автокореляції. Ж. Ву і Х. Чанг у своїй роботі [3] досліджували та порівнювали різні архітектури нейронних мереж, проте частина їх праці була виділена на дослідження впливу Covid-19 на зміну динаміки та значень котирувань основних криптоактивів. Публікація П. Азада та С. Аккора [4] в свою чергу містить аналіз застосування нейронних мереж для аналізу інформації блокчейну. Це є одним із методів отримання фундаментальних даних для прогнозування вартості досліджуваного виду цифрових активів. Наукову роботу Д. Аракі [5] можна віднести до 3 типу аналізу, а саме використання соціально-економічних даних. Дана робота описує та перевіряє ефективність NLP мережі для класифікації економічної інформації та новин, що згодом дозволяє застосовувати отримані результати при передбаченні ціни криптовалют. Праці Ж. Харіса і Н. Сахана [6] та С. Раю і А. Таріфа [7] використовують різні нейронні мережі для прогнозування, проте обидві ці роботи базуються на аналізі емоційного забарвлення твітів й застосуванні отриманої інформації при прогнозуванні майбутньої ціни певних криптовалют. В. Гургул та С. Лесман у публікації [8] провели прогнозування котирувань криптовалютів з використанням всіх згаданих видів аналізу, тобто технічного, фундаментального та соціально-економічного. Окрім аналізу новин та соціальних мереж, науковці досліджують вплив інших економічних факторів на ціну криптоактивів. Наприклад, робота С. Сінха і М. Бата [9] описує взаємозв'язок цін різних криптовалют між собою. Також важливими є дослідження, які направлені на визначення певних особливостей та характеристик, які властиві даному виду активів. А. Зекії і Ф. Амруш у своїй науковій праці [10] дослідили взаємозв'язок між параметрами різних мереж блокчейнів та надійністю відповідних токенів.

**Постановка завдання.** Метою статті є дослідження різних видів даних, які застосовуються для прогнозування вартості криптовалют та процесу їх збору та обробки. Це відбувається шляхом аналізу особливостей взаємодії з криптобіржами,

блокчейнами, а також певними соціальними мережами. В результаті проведеного аналізу необхідно сформулювати та описати особливості основних підходів для отримання та обробки інформації зі згаданих джерел.

Отримані висновки мають дозволити визначити особливості роботи з технічними, фундаментальними та соціально-економічними даними, а також систематизувати методи та засоби для створення датасету на основі цих видів інформації, що буде використовуватися для прогнозування вартості криптовалют.

**Виклад основного матеріалу.** Початковим етапом навчання майже усіх нейронних мереж є збір та обробка даних. Необхідний набір вхідної інформації залежить від поставленого завдання та цілей, які намагаються досягти. Основною метою прогнозування криптовалют є генерація найбільш точних прогнозів майбутніх котирувань на основі попередніх часових рядів. Остаточний набір даних залежить від методів аналізу, які будуть використовуватися при прогнозуванні ціни криптоактивів. На основі проведеного аналізу наукових досліджень та публікацій було визначено наступні підходи:

- технічний аналіз;
- фундаментальний аналіз;
- аналіз соціально-економічних факторів.

Технічний аналіз криптовалют базується на дослідженні історичних даних зміни вартості певної торгової пари. Зазвичай торговельні операції з криптовалютами відбуваються на відповідних платформах – криптобіржах. Так як поточна ціна криптоактиву формується шляхом відношення між попитом та пропозицією, ціна криптовалюти може відрізнитися в залежності від обраної біржі. Зазвичай ціни на різних біржах є приблизно однаковими, бо вони часто зрівнюються у зв'язку з арбітражем між ними. Для збору фундаментальних даних було обрано платформу Binance. Дана криптовалютна біржа є дуже популярною. Її користувачі проводять велику кількість торгових операцій, що робить її однією з лідируючих у світі за об'ємом.

Зазвичай для прогнозування вартості активів використовується графік OHLC. Він надає більш детальну інформацію про зміну ціни за певний проміжок часу у порівнянні з лінійним графіком. Інформація на цьому графіку представлена у вигляді «свічок». На основі «свічки» можна визначити ціну з якої почався період, ціна на якій закінчився період, а також мінімальну та максимальну позначки яких досягала ціна за дослі-

джуваний часовий проміжок. Відповідно до проведеного аналізу актуальних досліджень можна констатувати використання усіх 4 параметрів при прогнозуванні ціни криптовалют з використанням технічного аналізу. Врахування значень усіх згаданих цін показує вищу точну прогнозів на 10–15 % (в залежності від обраної архітектури мережі) при порівнянні з нейронними мережами, які враховують лише ціну відкриття або закриття.

Отже, для проведення ефективного технічного аналізу необхідно отримати набори даних, які містять інформацію у форматі OHLC графіку, тобто мають значення усіх 4 параметрів. Згадана біржа Binance надає потрібну інформацію, а доступ до неї відбувається за допомогою API, що дозволяє швидко та просто отримувати дані з сервісу Binance. Окрім цього, даний вебсервіс безкоштовно надає доступ до великого часового проміжку історичних даних та дозволяє отримувати оновлення інформації у режимі реального часу за допомогою вебсокетів.

Взаємодія зі згаданим вебсервісом може бути реалізована за допомогою модулю `python-binance`. Даний модуль є обгорткою для офіційного REST API Binance й дозволяє додаткам отримати доступ до історичних даних та додаткових функцій, які надаються користувачам криптобіржі.

У результаті використання цього модулю можна завантажити дані про зміну ціни за обрані проміжки часу. Ця інформація може одразу використовуватися у нейронних мережах, проте іноді вона додатково трансформується. На основі отриманих даних можна провести розрахунок різних технічних індикаторів, що застосовуються у трейдингу, наприклад: індекс відносної сили (Relative Strength Index, RSI), ковзна середня (Moving Average, MA), середній дійсний діапазон (Average True Range, ATR). Це дозволяє використовувати значення обчислених індикаторів, що зазвичай базуються на інструментах статистики, разом з інформацією про зміну ціни як вхідні дані нейронних мереж. Відповідно, зібрана та обчислена інформація буде використовуватися при навчанні нейронної мережі й генерації прогнозів щодо майбутніх котирувань криптоактивів.

Аналіз фундаментальних факторів є дуже популярним підходом при дослідженні таких інвестиційних інструментів як акції та облігації компаній. В основу даного виду оцінки вартості активів покладено вивчення та використання інформації, яка містить дані про результати їх операційної діяльності, метрики прибутковості, тощо. Криптоактиви відрізняються від згаданих видів активів

й не можуть аналізуватися з використанням фундаментальних метрик через свої певні особливості. Проте, можна певним чином видозмінити метод фундаментального аналізу й застосувати його для криптовалют.

Усі криптовалюти або токени базуються на технології блокчейн. Ця технологія являє собою децентралізований цифровий реєстр транзакцій, що зберігається протягом тривалого часу і захищений певними методами шифрування. Дані цього реєстру розподіляються за допомогою мережі комп'ютерів. Користувачі цієї технології можуть безпосередньо взаємодіяти зі збереженими даними у режимі реального часу, не потребуючи посередника для підтвердження справжності транзакцій.

Зміни у блокчейн вносяться у вигляді транзакцій. Усі нові транзакції об'єднуються у блоки, після чого додаються до мережі шляхом приєднання блоку до останнього блоку-елемента ланцюга. Так як усі дані є загальнодоступними їх можна переглядати у вільному доступі.

Наступним важливим етапом є розуміння того як дані з блокчейну можуть бути використані для прогнозування вартості криптовалют. Для цього розглянемо приклад, де проведемо аналогію між блокчейном та банком. Чим більше у банку клієнтів, тим більше він починає заробляти на кредитах та комісіях з транзакцій, збільшуючи таким чином свій прибуток. Кожний блокчейн у свою чергу має певну кількість активних користувачів. Чим більше користувачів у мережі, тим більше власників монет, що позитивно впливає на її ринкову капіталізацію. Зміна вартості мережі прямопро-

порційно впливає на вартість криптовалюти, яка є нативною для цього блокчейну.

У наш час існує велика кількість вебсервісів, які дозволяють зручно переглядати блоки, транзакції та іншу інформацію про згадані системи (рис. 1). Ці сервіси є дуже зручними та корисними, проте вони є обмеженими у можливостях отримати дані за великі проміжки часу. Навіть якщо подібний вебресурс надає таку можливість, отримання цих даних вимагає придбання платного доступу.

Вирішити цю проблему дозволяє одна з основних переваг технології блокчейн, а саме – децентралізованість. Ця особливість реалізується можливістю отримати доступ до мережі будь-кому хто має підключення до мережі Інтернет. Отже, мережі блокчейн дозволяють отримувати інформацію про усі зміни, які відбуваються в мережі. Програмна реалізація збору даних може відрізнятися для кожного окремого блокчейну, проте загальний концепт є ідентичним. Розглянемо особливості створення програмного модулю для отримання даних з наступних мереж: Bitcoin, Ethereum та Binance Smart Chain.

Для збору даних мережі Bitcoin можна використати вебсервіс Blockchain Info, який індексує дані усього блокчейну й надає можливість їх отримати за допомогою API. Даний інструмент забезпечує користувачам доступ до блокчейну та виконання пошуку і навігації по його даних. Використання цього вебсервісу значно спрощує завантаження інформації про блоки мережі Blockchain та збір статистики на основі отриманих даних.

За замовчуванням отримання даних з блокчейнів Ethereum та Binance Smart Chain відбувається

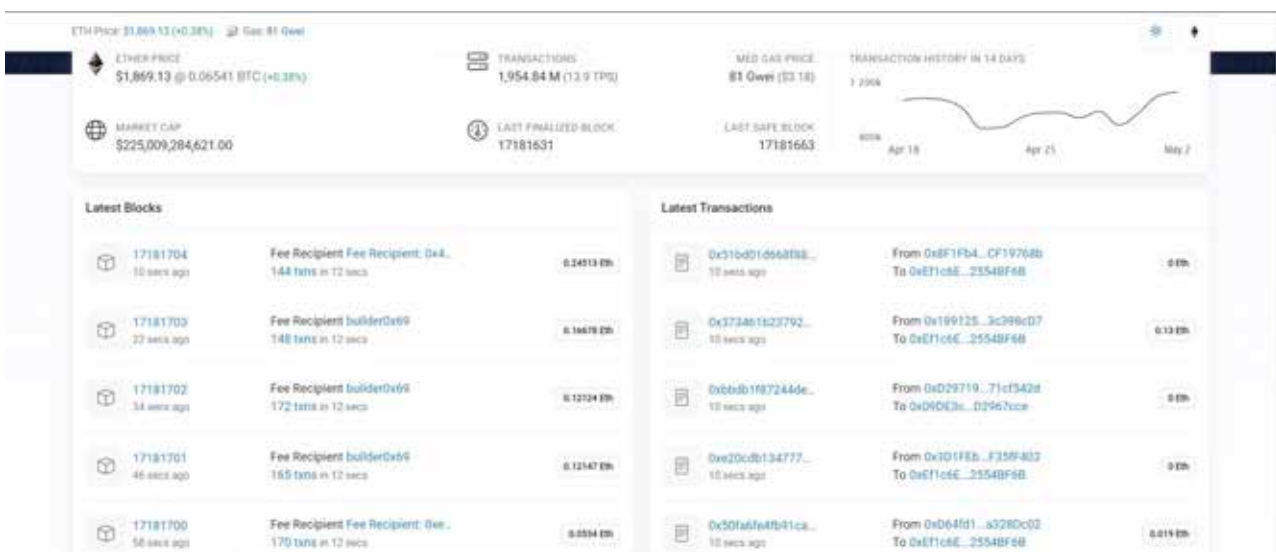


Рис. 1. Перегляд інформації про блокчейн Ethereum за допомогою вебресурсу Etherscan

за допомогою взаємодії з відповідним блокчейном через протокол RPC. Проте, розвиток технології Web3 сприяв використанню особливостей та механізмів даної технології у великій кількості програмних продуктів, що спричинило створення модулю web3. Загалом Web3 представляє собою наступне покоління технології Інтернет, що характеризується децентралізацією як інфраструктурних елементів, так і додатків. Ця інновація надає користувачам більший контроль над їх даними та взаємодією у мережі. Web3 націлена на забезпечення більш децентралізованого та орієнтованого на користувача Інтернету, що сприятиме покращенню безпеки, приватності та інклюзивності при взаємодії у мережі.

Для комунікації з мережею Ethereum необхідно використовувати сервіс Infura (або будь-який інший подібний), що дозволяє отримувати інформацію без розгортання блокчейну на локальному комп'ютері. Даний сервіс забезпечує підтримку вузлів різних мереж і надає користувачам доступ до даних блокчейну, перегляду транзакцій та взаємодії з смарт-контрактами через API. Окрім цього, даний засіб надає доступ до децентралізованої мережі, що дозволяє взаємодіяти з нею за допомогою згаданого модулю web3. На відміну від мережі Ethereum, Binance Smart Chain спрощує процес доступу надаючи відкриті сервіси для взаємодії з мережею. Це позбавляє розробників необхідності розгортати копію блокчейну локально або шукати сервіси, які будуть це робити за них.

Доступ до блокчейну дозволяє зчитувати інформацію про блоки та транзакції, які містяться в цих блоках. Кожна транзакція має певні параметри, що можуть бути використані для проведення аналізу, наприклад: адреса відправника, адреса отримувача, сума переказу, сплачена комісія, тощо. Незважаючи на те, що параметри є заздалегідь визначеними, дослідник може визначити та обчислити певні власні метрики, що можуть бути ефективними при вирішенні задачі прогнозування вартості. Наприклад, можна проводити аналіз зміни кількості транзакцій у блоці або сумі сплачених комісій. У випадку якщо кількість транзакцій зростає – це може свідчити про зростання активності у досліджуваній мережі, що у свою чергу може викликати залучення додаткового капіталу, зростання вартості блокчейну й відповідно ціни криптовалюти або певного токена.

Обчислення визначених метрик може відбуватися як на основі інформації блоків, так і шляхом ітеративного перебору кожної транзакції та збору необ-

хідних даних. Однак, при роботі з цим джерелом даних необхідно усвідомлювати важливість оптимізації системи збору. Саме правильна організація роботи модулю з цим великим масивом даних дозволяє ефективно формувати аналітичні дані з мінімальними затратами обчислювальних ресурсів.

Криптовалюти та сфера децентралізованих технологій дуже тісно пов'язана з різними спільнотами. Даний вид сучасних технологій викликає цікавість у суспільства через свій значний потенціал розвитку нового етапу інтернет-технологій. Однак, популярність блокчейну, Web3 й як наслідок вартості криптовалют та токенів зростає за допомогою росту попиту з боку спільнот й оптимістичного погляду на майбутнє даної сфери.

Згадану особливість варто враховувати при аналізі та прогнозуванні курсу криптоактивів. Це можна реалізувати шляхом збору набору даних, який містить статистику щодо зміни настроїв відносно тієї чи іншої криптовалюти або токена. Даний вид аналізу (сентиментальний аналіз) можна проводити за допомогою обробки твітів з мережі X (Twitter). Це відбувається шляхом фільтрації та отримання твітів за певними параметрами та ключовими словами. Усі зібрані твіти зберігаються, після чого відбувається процес їх обробки засобами NLP. Для цього можна використовувати бібліотеку nltk. Вона надає набір інструментів для обробки та аналізу природних мов. Використання даної бібліотеки дозволяє провести аналіз емоційного забарвлення твітів шляхом їх попередньої обробки, аналізу та класифікації. Для прогнозування вартості криптовалют можна розподілити усі твіти у 3 категорії:

- негативні;
- нейтральні;
- позитивні.

Колекція твітів формується шляхом завантаження набору записів, які містять відповідні хештеги, достатню кількість переглядів і підписників у автора, а також відповідають певним іншим критеріям. Розподіл твітів у категорії відбувається за допомогою використання відповідного методу бібліотеки. Він надає можливість отримати оцінку емоційного забарвлення тексту повідомлення, що дозволяє віднести його до відповідної групи. На основі аналізу визначеної кількості твітів за певний проміжок часу формується статистична інформація про кількість позитивних, негативних та нейтральних повідомлень. Далі ця статистична інформація може використовуватися як часовий ряд й відповідно зміна кількості повідомлень у кожній категорії матиме вплив на результат прогнозування ціни криптовалюти.

**Висновки.** Використання різноманітних видів даних при прогнозуванні вартості криптовалют є досить актуальною тематикою, що досліджується багатьма науковцями. Незважаючи на те, що є велика кількість робіт, які намагаються визначити закономірності між зміною котирувань криптоактивів та певними наборами даних, усі джерела даних можна згрупувати у 3 категорії: технічні, фундаментальні та соціально-економічні. Кожна зі згаданих категорій вимагає окремого процесу для збору та обробки цих даних.

На основі визначених особливостей, був проведений опис методів роботи з кожним дже-

релом інформації та досліджені певних бібліотек, що дозволяють створити універсальні програмні модулі для збору даних кожного виду. Це було реалізовано шляхом більш глибоко дослідження самих джерел даних та засобів взаємодії з ними.

В результаті було наведено приклади створення набору даних з використанням інформації, яка належить усім 3 попередньо згаданим категоріям. Це дозволило дослідити процес на прикладному рівні, що спростить етап програмної реалізації засобів збору інформації для прогнозування вартості криптовалют.

### Список літератури:

1. MODI, Parth Daxesh, et al. A Data-driven Deep Learning Approach for Bitcoin Price Forecasting. In: 2023 24th International Conference on Digital Signal Processing (DSP). IEEE, 2023. p. 1–4.
2. LIU, Shun, et al. Financial time-series forecasting: Towards synergizing performance and interpretability within a hybrid machine learning approach. arXiv preprint arXiv:2401.00534, 2023.
3. WU, Jingyang, et al. Review of deep learning models for crypto price prediction: implementation and evaluation. arXiv preprint arXiv:2405.11431, 2024.
4. AZAD, Poupak; AKCORA, Cuneyt Gurcan; KHAN, Arijit. Machine Learning for Blockchain Data Analysis: Progress and Opportunities. arXiv preprint arXiv:2404.18251, 2024.
5. ARACI, Dogu. Finbert: Financial sentiment analysis with pre-trained language models. arXiv preprint arXiv:1908.10063, 2019.
6. HARITHA, G.; SAHANA, N. Cryptocurrency price prediction using twitter sentiment analysis. In: CS & IT conference proceedings. *CS & IT Conference Proceedings*, 2023.
7. RAJU, S. M.; TARIF, Ali Mohammad. Real-time prediction of BITCOIN price using machine learning techniques and public sentiment analysis. arXiv preprint arXiv:2006.14473, 2020.
8. GURGUL, Vincent; LESSMANN, Stefan; HÄRDLE, Wolfgang Karl. Forecasting Cryptocurrency Prices Using Deep Learning: Integrating Financial, Blockchain, and Text Data. arXiv preprint arXiv:2311.14759, 2023.
9. SINGH, Shubham; BHAT, Mayur. Transformer-based approach for Ethereum Price Prediction Using Crosscurrency correlation and Sentiment Analysis. arXiv preprint arXiv:2401.08077, 2024.
10. ZEKIYE, Abdulrezzak, et al. AI-Assisted Investigation of On-Chain Parameters: Risky Cryptocurrencies and Price Factors. In: 2023 Fifth International Conference on Blockchain Computing and Applications (BCCA). IEEE, 2023. p. 52–59.

### Sitailo M.S. RESEARCH ON THE DATA MINING PROCESS FOR USE IN CRYPTOCURRENCY PRICE PREDICTION

*Artificial intelligence-based tools continue to rapidly gain popularity across various fields and find applications in solving specific practical problems. Despite the wide range of tasks that can be addressed with these tools, the process of developing neural networks consists of defined stages that are similar for almost all tasks. Data mining is an important stage in developing an AI-based solution. The volume and variability of the created dataset have a significant impact on the effectiveness of the developed neural network. Although the data collection process consists of certain defined stages, the specifics of the task often require additional operations. Asset price prediction has been a relevant task for a significant period of time. This encourages the active search for various methods that can improve prediction results. While this task is quite similar to predicting the prices of other types of assets, the features of blockchain technology introduce certain peculiarities during its resolution. Access to blockchain data allows for obtaining information about all transactions with certain cryptocurrencies or tokens, enabling the consideration of these factors in conducting fundamental analysis.*

*This article contains an analysis of current research related to the analysis of various types of data that can be used in predicting cryptocurrency quotations. Based on the conducted analysis, the features of working with the main categories of data sources used for technical, fundamental, and socioeconomic analyses were determined. The article also includes the description and design of the process of mining and processing data from crypto exchanges, blockchains, and social networks.*

*The obtained results contributed to conducting a practical study on the data mining process for cryptocurrency price prediction. This involved familiarizing with various web resources or software tools that can be applied to solve the given task. Based on the results, a description of the process of interacting with crypto exchanges, blockchains, and social media data was conducted to collect all considered categories of data. This process is based on the use of application programming interfaces, libraries for interacting with blockchains, and natural language processing libraries to assess the emotional tone of messages in certain social networks.*

**Key words:** *data collection and processing, cryptocurrencies, dataset, socioeconomic analysis, technical analysis, fundamental analysis.*

**Сопов О.О.**

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

**Жаріков Е.В.**

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

## ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ ЗАСОБИ ДЛЯ СИМУЛЯЦІЇ РОЗМІЩЕННЯ КОНТЕЙНЕРІВ У ХМАРНОМУ ЦЕНТРІ ОБРОБКИ ДАНИХ

Використання контейнерної віртуалізації для розгортання застосунків у хмарі набирає все більшого попиту, адже дозволяє робити це з меншою кількістю надлишкових ресурсів, та швидше, ніж класичний варіант віртуалізації – з використанням віртуальних машин. Перед хмарними провайдерами постає задача ефективного управління ресурсами, а саме ефективного розміщення контейнерів на обчислювальних вузлах. Така задача вимагає розроблення та застосування ефективних стратегій, спрямованих на зменшення кількості одночасно включених фізичних серверів, на зменшення часу порушення SLA, та на покращення інших цільових метрик хмарних обчислень. Вивчення нових підходів розміщення контейнерів із використанням виробничого середовища є дорогим і нестабільним, адже може заважати стабільній роботі вже існуючих хмарних послуг, що може призвести до порушення SLA. У статті розроблена математична модель трирівневої задачі розміщення контейнерного навантаження та інструментарій для симуляції розміщення контейнерів у хмарному центрі обробки даних (ЦОД). Запропоновані алгоритми роботи симулятора та наведено діаграми діяльності, класів та компонентів інструменту симуляції, та їх детальний опис. Запропонований у статті інструментальний засіб для симуляції розміщення контейнерів у хмарі дозволяє проаналізувати різні стратегії управління кластером фізичних машин і віртуальних машин на них, робити експерименти для вибору оптимальних стратегій та експериментувати, не використовуючи існуюче виробниче середовище. Запропонована архітектура дозволяє легко додавати нові стратегії керування шляхом наслідування від існуючих абстракцій. Реалізовано широкий спектр можливостей логування результатів експериментів, що дозволяє проаналізувати роботу стратегій для різних критеріїв оптимізації. Реалізовано можливість конфігурування параметрів ЦОД, та генерації запитів на розміщення контейнерів за заданим бета-розподілом. Проведено серію експериментів, які підтверджують правильність, стабільність та ідемпотентність розробленого інструменту, наведено результати проведення експериментів.

**Ключові слова:** контейнерна віртуалізація, хмарний ЦОД, розміщення контейнерів, оптимізація, архітектура, симулятор.

**Постановка проблеми.** У сучасному світі інформаційних технологій віртуалізація на основі контейнерів відіграє ключову роль у розробці та розгортанні програмного забезпечення, виходячи на передній план завдяки своїй гнучкості та ефективності. Провайдери хмарних послуг стикаються зі складним завданням оптимізації розміщення контейнерів, яке вимагає не тільки великої масштабованості, але й високої відповідності до змінюваних вимог користувачів та додатків.

Вивчення нових підходів розміщення контейнерів із використанням виробничого середовища є дорогим і нестабільним, адже може заважати стабільній роботі вже існуючих хмарних послуг, що може призвести до порушення SLA [1–3].

Симулятор розміщення контейнерів може зіграти важливу роль у зниженні ризиків, вартості та складності інфраструктури перш ніж рішення

можна буде розгорнути на реальній інфраструктурі [4]. Зосереджуючись на питаннях, пов'язаних із якістю певного компонента за різних сценаріїв, симулятори дозволяють інженерам відстежувати поведінку системи.

Отже, розробка ефективних інструментальних засобів для симуляції розміщення контейнерів є необхідною для хмарних ЦОД, адже дозволить експериментувати з новими стратегіями розміщення контейнерів, одночасно не впливаючи на виробниче середовище.

Інструмент, запропонований у цій статті, базується на симуляції різних сценаріїв розміщення контейнерів з використанням комплексних параметрів, таких як модель системи, вхідне робоче навантаження, політики управління ресурсами: фізичними серверами (ФС) та віртуальними машинами (ВМ), кількість і типи серверів, та типи

віртуальних машин у ЦОД. Дозволяє моделювати процеси створення нових контейнерів, а також отримувати всю основну статистику у будь-який момент часу симуляції: кількість порушень SLA (Service Level Agreement), кількість ФС та ВМ, використання ресурсів на кожному ФС та ВМ.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Задача розміщення ресурсів у хмарному ЦОД представлена в численних дослідженнях, присвячених різним аспектам оптимізації ІТ-інфраструктури. Великої уваги серед науковців набрала тема розміщення ВМ на ФС, яка є однією із задач при розміщенні контейнерів.

У [4–7] автори аналізують велику кількість робіт, де представлені хмарні симулятори. Розглянуті симулятори створені для певних цілей і мають різні функції в кожному з них. Автори представляють всебічне дослідження основних хмарних симуляторів, висвітливши їх важливі функції та аналізують їх переваги та недоліки. Велика кількість симуляторів потребує більш гнучкого налаштування, можливості впливати на більшу кількість показників, більш обширне логування та кращі можливості експорту результатів симуляції. Проаналізовані симулятори не надають функціональності симуляції розміщення контейнерів. Більшість симуляторів беруть до уваги обмежену кількість параметрів ресурсної ємності, а саме, процесорний час та оперативну пам'ять.

Автори у роботах [8–9] використовують можливості симулятора Cloudsim [10], метою якого є надання узагальненої структури моделювання, яка дає змогу моделювати, симулювати та експериментувати з інфраструктурами хмарних обчислень, дозволяючи користувачам зосередитися на конкретних питаннях проектування системи, які вони хочуть дослідити, не турбуючись про низькорівневі параметри, пов'язані з хмарними інфраструктурами та службами. Cloudsim має можливість роботи із контейнерним навантаженням, проте така можливість є обмеженою: відсутня можливість динамічно змінювати стратегії керування ФС та ВМ, параметр ресурсної ємності IOPS (Input/Output Operations Per Second, кількість операцій вводу/виводу за секунду) не аналізується, можливості логування обмежені.

Набір інструментів GridSim [11] був розроблений авторами для вирішення проблеми оцінки продуктивності реальних великомасштабних розподілених середовищ повторюваним і контрольованим способом. Проте, симуляція розміщення контейнерів відсутня.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є вирішення науково-практичної задачі створення

симулятора розміщення контейнерів у хмарному ЦОД задля розроблення та аналізу нових стратегій розміщення контейнерів із використанням середовища, близького до виробничого, що дозволить покращити існуючі рішення, шляхом: створення архітектури для симуляції не тільки розміщення віртуальних машин, а також і контейнерів; збільшення кількості параметрів, які аналізуються (CPU, RAM, IOPS, дисковий простір); покращення логування та методів експорту результатів експерименту.

У результаті, це дослідження спрямоване на розширення наукових та практичних знань у сфері управління хмарними ресурсами, використовуючи сучасні інструменти моделювання для вирішення конкретних задач оптимізації розміщення контейнерів. Такий підхід дозволить реалізувати більш ефективні, надійні та гнучкі хмарні сервіси відповідно до високих стандартів ІТ-індустрії.

#### **Виклад основного матеріалу**

##### **Задача розміщення контейнерів**

Розміщення контейнерів є однією з важливих задач управління ресурсами хмарних ЦОД, яка полягає в тому, щоб визначити оптимальний спосіб розподілу контейнерів між фізичними та віртуальними серверами. Контейнери – це легковагові ізольовані середовища для запуску різних застосунків у хмарі, які мають ряд переваг перед традиційними віртуальними машинами, такі як: швидше розгортання, менша витрата ресурсів, більша гнучкість та масштабованість. Однак, розміщення контейнерів також ставить перед дослідниками та практиками складні задачі оптимізації, пов'язані з балансуванням навантаження, енергоефективністю, надійністю та якістю обслуговування.

Провайдер хмарних послуг стикається з трьохрівневим завданням динамічної консолідації контейнерів, яке вимагає оперативного реагування на поточні запити клієнтів в онлайн-режимі. Завдання розміщення контейнера розділяється на дві ключові підзадачі: по-перше, вибір відповідної віртуальної машини для запуску контейнера, а у разі її відсутності – створення нової ВМ та її розміщення на доступному фізичному сервері. По-друге, якщо необхідний фізичний сервер не включений, слід його перевести у активний стан. У випадку відсутності доступних фізичних ресурсів, запит клієнта на послугу може бути відхилений, що призводить до порушення умов SLA.

Оптимізаційною задачею провайдера хмарних послуг є мінімізація використання ресурсів, що в свою чергу, досягається зменшенням часу порушення SLA, та зниження кількості одночасно активних ФС.



У структурі хмарного провайдера наявні фізичні сервери, позначені як  $PM = \{PM_1, \dots, PM_n\}$ , кожен з яких може перебувати в увімкненому або вимкненому стані. На  $i$ -му фізичному сервері можуть розташовуватися віртуальні машини, що позначаються як  $VM = \{VM_{i,1}, \dots, VM_{i,m}\}$ . В свою чергу, на  $j$ -й віртуальній машині розміщуються контейнери, представлені як  $C = \{C_{i,j,1}, \dots, C_{i,j,k}\}$ . Ресурсна ємність кожного з цих компонентів описується в рівнянні 1:

$$resourceCapacity_i = (w_i^{dim1}, w_i^{dim2} \dots w_i^{dimn}), \quad (1)$$

де  $dim$  – ресурс, для якого визначається ресурсна ємність. Тому для  $PM$ ,  $VM$  і  $C$  ресурсна ємність описується як (2–4):

$$PM_i = (PM_i^{CPU}, PM_i^{RAM}, PM_i^{DISK}, PM_i^{IOPS}), \quad (2)$$

$$VM_i = (VM_i^{CPU}, VM_i^{RAM}, VM_i^{DISK}, VM_i^{IOPS}), \quad (3)$$

$$C_i = (C_i^{CPU}, C_i^{RAM}, C_i^{DISK}, C_i^{IOPS}), \quad (4)$$

де  $CPU, RAM, DISK, IOPS$  – ресурсна ємність за процесором, оперативною пам'яттю, дисковим простором та кількістю операцій вводу/виводу за секунду.

На рисунку 1 зображено трирівневу модель розміщення контейнерів у хмарному ЦОД. Контейнери розміщено на віртуальних машинах, які у свою чергу розміщено на фізичних серверах у ЦОД [12].

Обмеження розміщення VM на  $i$ -му фізичному сервері показано у нерівності (5). Для розміщення віртуальної машини на фізичному сервері справедливо:

$$\sum_{j=1}^N VM_{i,j} x_{i,j} \leq PM_i, \quad (5)$$

де  $N$  – кількість віртуальних машин,

$i$  – номер фізичного сервера,

$x_{i,j} = 1$ , якщо віртуальну машину  $j$  розміщено на фізичному сервері  $i$ , інакше  $x_{i,j} = 0$ .

Обмеження розміщення контейнера на  $j$ -й віртуальній машині показано у нерівності (6). Для розміщення контейнера на віртуальній машині справедливо:

$$\sum_{k=1}^K C_{i,j,k} y_{j,k} \leq VM_{i,j}, \quad (6)$$

де  $K$  – кількість контейнерів,

$i$  – номер фізичного сервера,

$j$  – номер віртуальної машини,

$y_{j,k} = 1$ , якщо контейнер  $k$  розміщено на віртуальній машині  $j$ , інакше  $y_{j,k} = 0$ .

### Архітектура та алгоритми інструментарію

Розглянемо розроблену архітектуру інструментальних засобів для симуляції динамічного розміщення контейнерів у хмарному ЦОД, а саме – діаграму класів, діаграму компонентів, та діаграму діяльності симуляції розміщення контейнерів. На рисунку 2 показано діаграму діяльності одного циклу симуляції розміщення контейнерів у хмарному ЦОД.

При запиті клієнта на розміщення контейнера з ресурсною ємністю  $C$ , симулятор виконуватиме наступні дії. Відповідно до (6), контейнер може бути розміщений на віртуальній машині лише за умови достатньої вільної ресурсної ємності  $r(VM_i)$ . На початку циклу симуляції обирається стратегія VMP по вибору віртуальної машини, на яку далі буде розміщено контейнер. Можливість вибору стратегії під час симуляції дозволяє тестувати динамічний вибір стратегій, з можливістю реагування на зовнішні чинники. За допомогою обраної стратегії VMP, обирається віртуальна машина, або приймається рішення про необхідність створення нової. Серед наявних розроблених стратегій є: First Fit, Best Fit, та Worst Fit [13]. Проте, архітектура інструменту легко масштабована, і можна додати нові стратегії

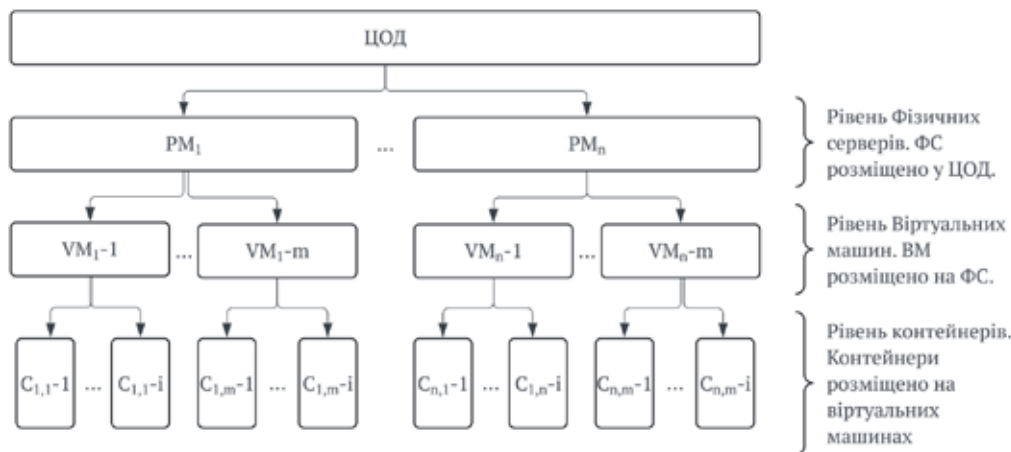


Рис. 1. Тривірнева модель розміщення контейнерів у хмарному ЦОД

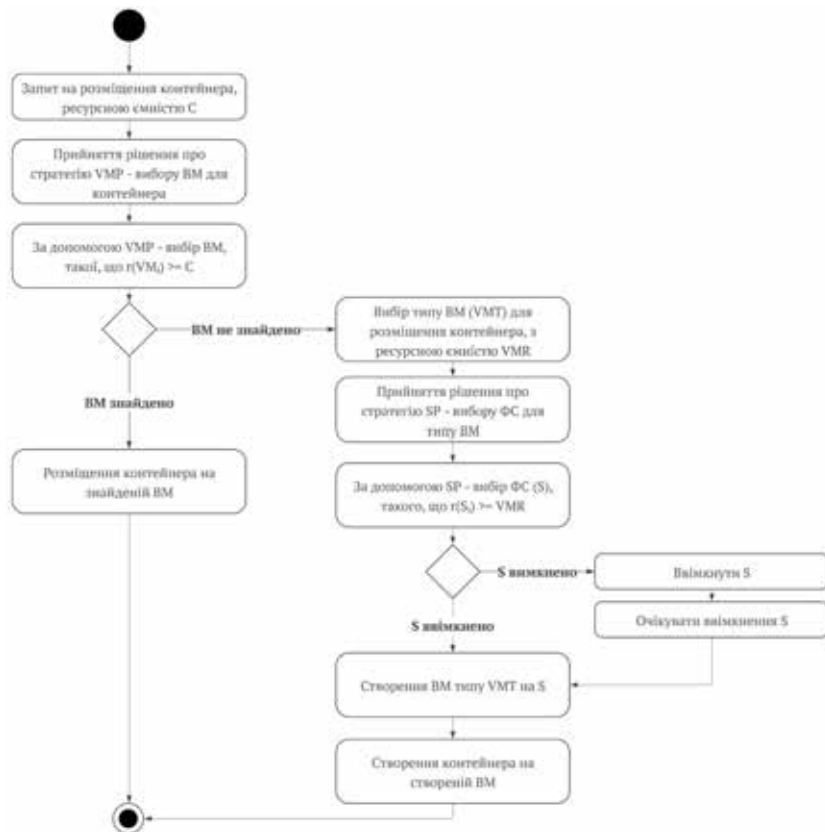


Рис. 2. Діаграма діяльності одного циклу симуляції розміщення контейнерів у хмарному ЦОД

за необхідності, такі, як, наприклад, розроблені авторами у роботах [14–15]. Якщо обрано існуючу віртуальну машину, то контейнер розміщується на ній та алгоритм завершує роботу.

Проте, якщо прийнято рішення про створення нової віртуальної машини, то обирається тип віртуальної машини, необхідної для розміщення контейнера та обирається ФС, на якому розмістити таку віртуальну машину. Вибір ФС відбувається за допомогою обраної стратегії розміщення серверів SP. Якщо знайдений сервер ввімкнено, то віртуальна машина розміщується на цьому сервері, а контейнер на віртуальній машині. Інакше – ФС вмикається (переходить з режиму резерву до робочого), і виконуються всі вище перелічені дії.

На рисунку 3 зображено діаграму класів інструменту симуляції розміщення контейнерів у хмарному ЦОД. Для наочності, невелику частину класів, таких як класи конфігурації, опущено. Ключовим тут є клас Simulator – ядро процесу симуляції. Основним параметром, який подається на вхід симулятора є об’єкт SimulatorConfig. На базі даної конфігурації збирається об’єкт класу CloudProvider, який відповідатиме на симульовані запити на розміщення контейнера. Будь-який запит на розміщення контейнера, в першу чергу, оброблюється у класі CloudProvider.

CloudProvider для розміщення контейнерів використовує VMSelectionStrategy та ServerSelectionStrategy. VMSelectionStrategy відповідає за вибір одного з підкласів VMSelector, в залежності від поточної обраної стратегії. VMSelector безпосередньо обирає необхідну віртуальну машину для розміщення контейнера або генерує запит на створення нової.

ServerSelectionStrategy відповідає за вибір одного з підкласів ServerSelector в залежності від поточної обраної стратегії. ServerSelector безпосередньо обирає необхідний сервер для розміщення віртуальної машини, і, за потреби, вмикає його.

Наявність VMSelectionStrategy та ServerSelectionStrategy дозволяє динамічно, в режимі реального часу, керувати стратегіями вибору віртуальних машин і серверів. Кожна подія симуляції логується у Reporter, що дозволяє дізнатись стан симуляції у будь-який момент часу, та дозволяє експортувати результати у необхідному форматі.

CloudProvider має доступ до DALService, який комунікує з базою даних, що дає можливість під час симуляції ретроспективно аналізувати оброблені запити для динамічної зміни стратегії керування.

На рисунку 4 показано діаграму компонентів інструменту симуляції розміщення контейнерів у хмарному ЦОД.

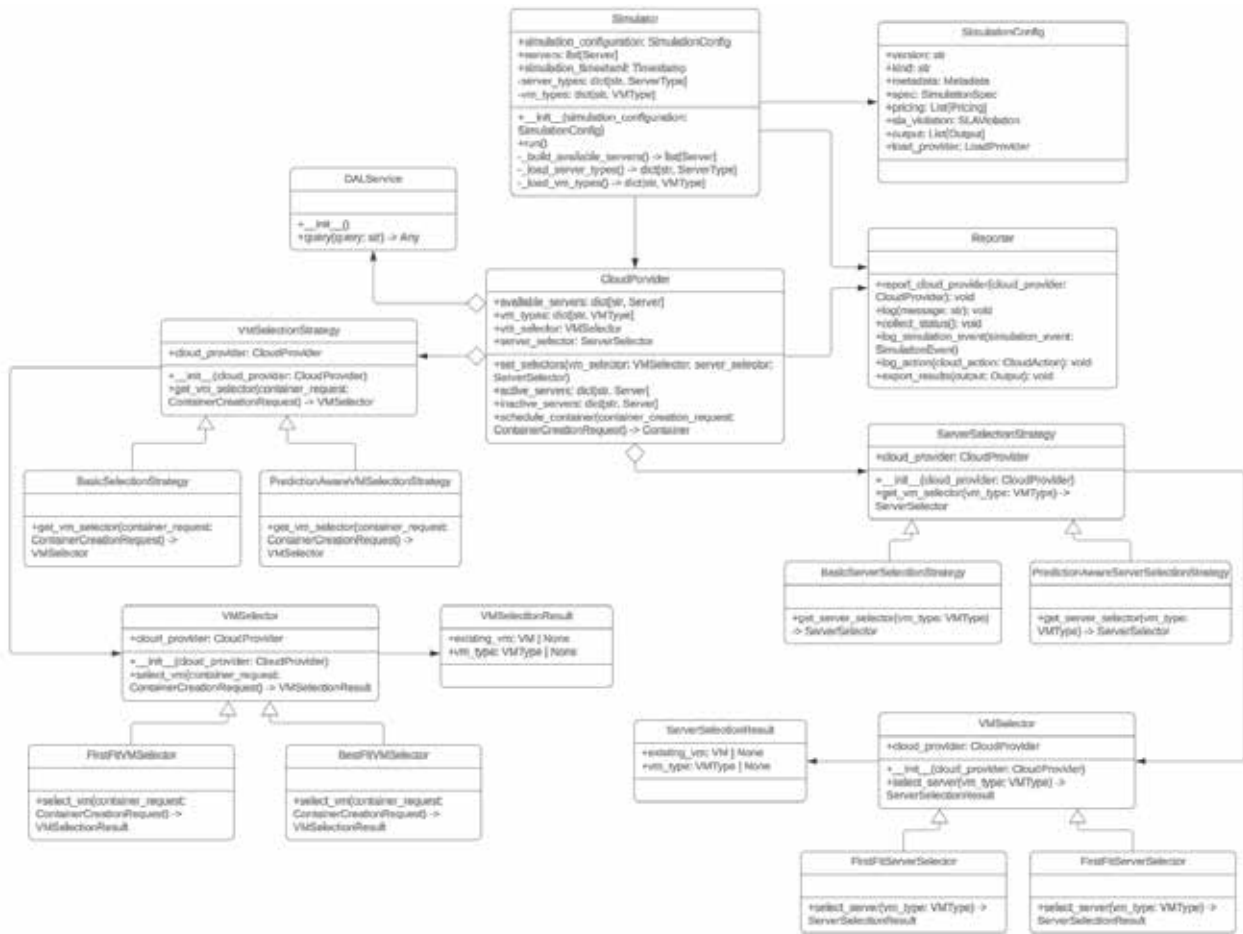


Рис. 3. Діаграма класів інструменту симуляції розміщення контейнерів у хмарному ЦОД

Пакет Simulation містить основну логіку симуляції, реалізацію покрокового виконання симуляції. Пакет Configuration містить логіку десеріалізації файлів конфігурації та, безпосередньо, моделі конфігурації. Пакет CloudProvider містить всю логіку розміщення контейнерів у хмарному ЦОД, логіку вибору VM та ФС. Пакет DAL містить логіку роботи з базою даних.

### Проведення експериментів

Реалізацію інструментальних засобів для симуляції динамічного розміщення контейнерів у хмарному ЦОД виконано за допомогою мови програмування Python [16]. Конфігурацію експерименту задано за допомогою Yaml файлу, зображеного на рисунку 5.

Навантаження для експерименту генерується випадковим чином у бета-розподілі. Файл конфігурації для генерації навантаження випадковим чином показано на рисунку 6.

Для запуску інструменту розроблено інтерфейс командного рядка, результат роботи якого показано на рисунку 7.

На випадково згенерованому (за бета-розподілом) навантаженні проведено серію із 10 експе-

риментів. Експериментально підтверджено, що результати експерименту на однаковому наборі даних однакові, що свідчить про стабільність інструментарію та його ідемпотентність. Розроблений інструмент можливо використовувати для порівняння різних стратегій розміщення контейнерів у хмарному ЦОД.

Розроблений інструментарій має широкі можливості логування: кожен крок симуляції логується, і статус симуляції відображається у консолі та файлі логу. Наприклад, на рисунку 8 зображено стан симуляції після декількох її кроків.

Результати експерименту логуються у файли журналу у форматі JSON, що дає змогу візуалізувати такі дані у будь-якому зручному інструменті, наприклад, за допомогою MS Excel, matplotlib, тощо. Логується інформація про стан всіх серверів, віртуальних машин, контейнерів, логуються запити на розміщення контейнерів та фактичний час їх розгортання. На рисунку 9 показано навантаження на сервери по CPU. Візуалізацію виконано шляхом візуалізації даних, які експортовані інструментом.

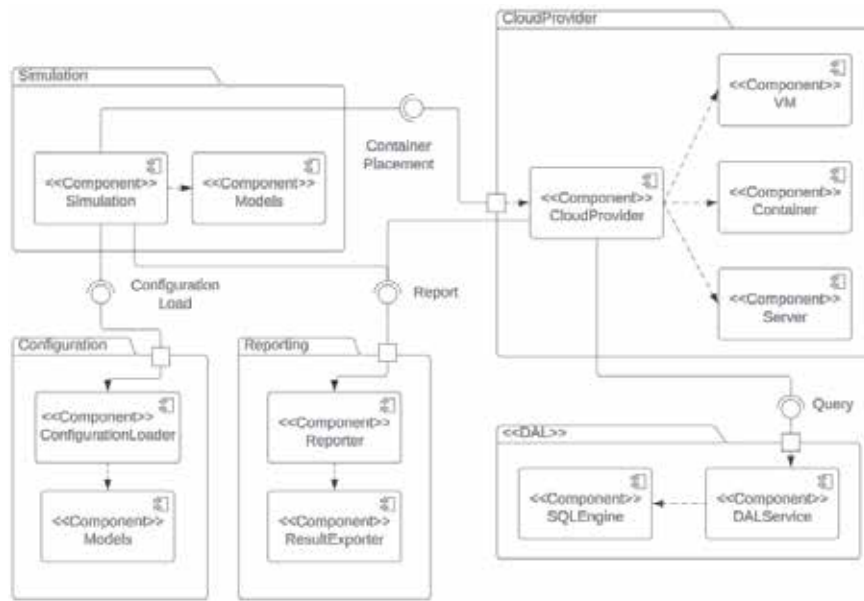


Рис. 4. Діаграма компонентів інструменту симуляції розміщення контейнерів у хмарному ЦОД

```

version: v1
kind: Simulation
metadata:
  name: experiment-1
spec:
  available:
    - server_type: x-large
      quantity: 10
    - server_type: x-medium
      quantity: 5
  server_types:
    - name: x-medium
      seconds_to_up: 20
      resource_capacity:
        cpu: 3
        memory: 16384
        storage: 256000
        iops: 40000
    - name: x-large
      seconds_to_up: 50
      resource_capacity:
        cpu: 24
        memory: 131072
        storage: 1024000
        iops: 60000
  vm_types:
    - name: x-small
      seconds_to_up: 5
      resource_capacity:
        cpu: 1.5
        memory: 8192
        storage: 126000
        iops: 15000
    - name: x-medium
      seconds_to_up: 5
      resource_capacity:
        cpu: 8
        memory: 43690
        storage: 341333
        iops: 20000
    - name: x-large
      seconds_to_up: 5
      resource_capacity:
        cpu: 24
        memory: 65536
        storage: 512000
        iops: 30000
  vm_selection_strategy: BasicVMSelectionStrategy
  server_selection_strategy: BasicServerSelectionStrategy
  pricing:
    - cpu: 0.01
      memory: 0.0001
      storage: 0.00001
      iops: 0.000001
  sla_violation:
    cost: 0.5
  output:
    type: json
    path: results/result.json
  load_file:
    type: csv
    path: load/output.csv
    
```

Рис. 5. Файл конфігурації експерименту

```

version: v1
kind: LoadGeneration
type: random_ranged
distribution:
  type: beta_distribution
  alpha: 2
  beta: 5
output:
  type: csv
  path: load/output.csv
time_between_requests:
  low: 1
  high: 1000
requests: 130
ranges:
  cpu:
    low: 0.5
    high: 3
  memory:
    low: 256
    high: 3096
  storage:
    low: 1024
    high: 10240
  iops:
    low: 100
    high: 2000
    
```

Рис. 6. Файл конфігурації навантаження

Usage: main.py [OPTIONS] COMMAND [ARGS]...

```

Options
--help Show this message and exit.

Commands
generate-load Generate load based on the configuration file.
simulate Run the simulation based on the load configuration file.
    
```

Рис. 7. Інтерфейс командного рядка інструменту

\*\*\*\*\*  
STEP: 4

reporter.py:107  
reporter.py:107

Cloud Provider Status

| Server                   | VM                       | Container                | CPU      | Memory           | Disk               | IOPS            | State           |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------|------------------|--------------------|-----------------|-----------------|
| 959eb861-ecd9-44a5-8d... | 7f600602-d1ff-4354-98... |                          | 8.0/24.0 | 43698.0/131072.0 | 341333.0/1024000.0 | 20000.0/60000.0 | Status.ACTIVE   |
|                          |                          |                          | 5.7/8.0  | 5598.94/43698.0  | 24650.69/341333.0  | 2700.31/20000.0 | Status.ACTIVE   |
|                          |                          | ab77970c-1ea7-4066-95... | 1.75     | 972.97           | 6007.46            | 526.27          | Status.ACTIVE   |
|                          |                          | 84088920-fe1c-4a0a-a3... | 0.76     | 1455.22          | 4215.18            | 513.88          | Status.ACTIVE   |
|                          |                          | 49160c6d-cd79-420e-b9... | 0.99     | 642.73           | 4375.55            | 382.9           | Status.ACTIVE   |
|                          |                          | 690679c3-4b5f-4805-93... | 1.31     | 1286.43          | 5672.49            | 242.33          | Status.ACTIVE   |
| 7e137d7d-3319-46bf-ba... |                          | dc231d16-4714-4154-9e... | 0.89     | 1241.59          | 4380.01            | 1042.93         | Status.ACTIVE   |
| 974872e2-7b9c-4809-89... |                          |                          | 0.0/24.0 | 0.0/131072.0     | 0.0/1024000.0      | 0.0/60000.0     | Status.INACTIVE |
|                          |                          |                          | 0.0/24.0 | 0.0/131072.0     | 0.0/1024000.0      | 0.0/60000.0     | Status.INACTIVE |

Рис. 8. Можливості логування інформації

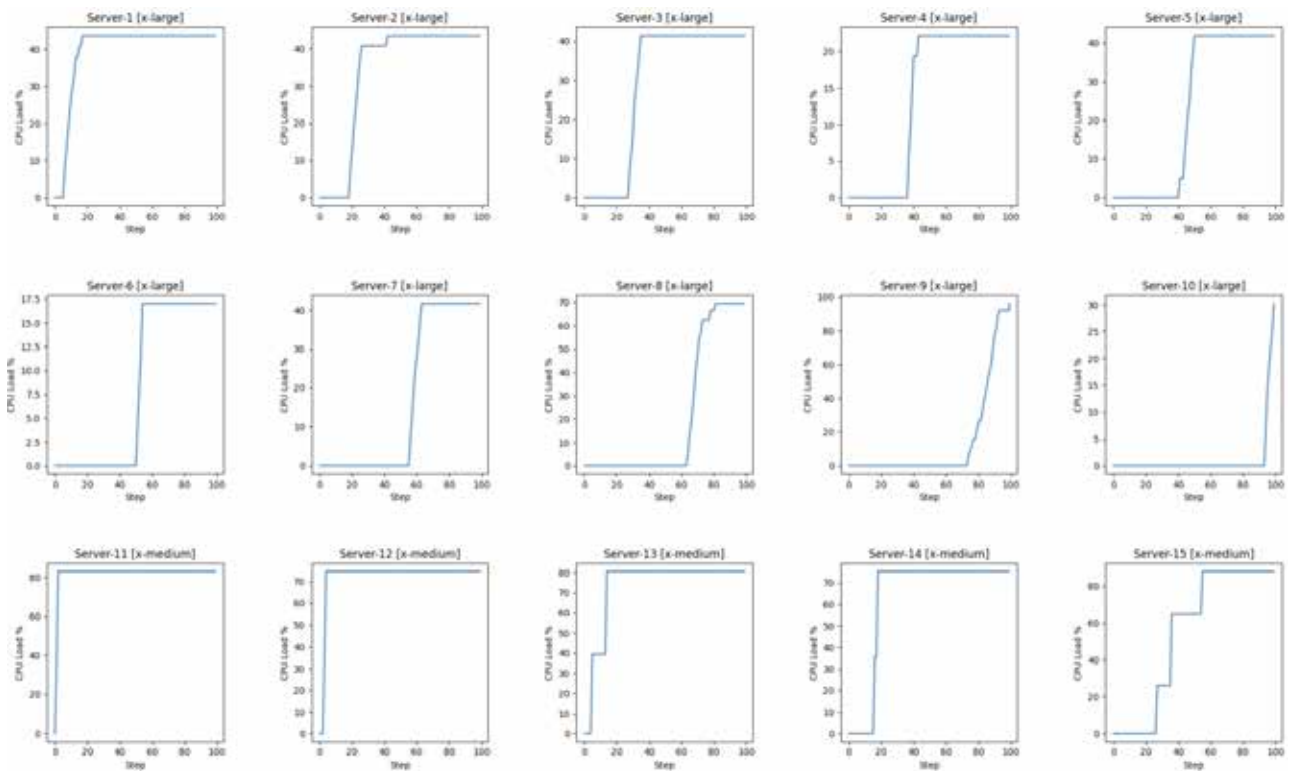


Рис. 9. Графік використання CPU на кожному з фізичних серверів

Під час експерименту обрано WorstFit стратегію, яка залишалась сталою протягом всього часу експерименту. Використання такої стратегії дозволяє виконувати енергоефективне управління хмарним ЦОД. З графіків видно, що сервери включаються по чергово. Надлишкові сервери заздалегідь не включено, що дозволяє зменшити використання електроенергії.

Завдяки експортованим даним є можливість варіативно візуалізувати дані та проаналізувати їх під багатьма доступними розрізами.

**Висновки.** Використання симуляторів для розміщення контейнерів є критично важливим, оскільки використання симулятора дозволяє знизити витрати, ефективно використовувати ресурси, зменшувати складність експериментів та ризики перед впровадженням нових рішень у реальну IT-інфраструктуру.

Аналіз показав, що наявні хмарні симулятори мають обмежену функціональність роботи із контейнерами, не враховують всі необхідні параметри ресурсної ємності та мають обмежені можливості логування та експорту результатів.

У статті запропоновано новий інструмент-симулятор розміщення контейнерів у хмарному ЦОД, який дозволяє моделювати розміщення контейнерів з урахуванням різних сценаріїв та параметрів ресурсної ємності, таких як CPU, RAM, IOPS та дисковий простір. Інструмент підтримує динамічне налаштування стратегій розміщення

контейнерів, що дозволяє адаптуватися до змінних умов.

Детально описано архітектуру розробленого інструменту, включаючи діаграми класів, компонентів та діяльності. Розроблена архітектура дозволяє легко масштабувати рішення для експериментів з будь-якими стратегіями розміщення як VM, так і ФС.

Проведено серію експериментів, які підтвердили стабільність та ідемпотентність роботи інструменту. Результати експериментів показали можливість використання інструменту для порівняння різних стратегій розміщення контейнерів та ефективного управління ресурсами хмарного ЦОД.

Інструмент забезпечує детальне логування всіх етапів симуляції та підтримує експорт результатів у зручних форматах для подальшого аналізу та візуалізації, що дозволяє глибше розуміти процеси та оптимізувати управління ресурсами хмарного ЦОД.

Розроблений інструментальний засіб дозволяє аналізувати нові підходи розміщення контейнерів із використанням середовища, близького до виробничого.

Подальші дослідження необхідно зосередити на розробленні ефективних методів керування контейнерами у хмарному ЦОД для трирівневої моделі розміщення контейнерів, додаванні можливостей керування міграціями у розроблений інструментальний засіб, а також інтеграцію з OpenStack.

#### Список літератури:

1. Liao W., Draper J. Cloud Computing and Docker Containerization: A Survey. *Proceedings of the West Virginia Academy of Science*. 2019. Т. 91. № 1. URL: <https://doi.org/10.55632/pwvas.v91i1.505>.
2. Pusapati S. S. V. Containerization. *Advances in Systems Analysis, Software Engineering, and High Performance Computing*. 2024. С. 98–122. URL: <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-1682-5.ch006>.
3. Raghav Goel and Dr. Bhoomi Gupta. Introduction to Containerization. *International Journal for Modern Trends in Science and Technology*. 2020. Т. 6. № 12. P. 294–300. URL: <https://doi.org/10.46501/ijmtst061255>.
4. Mansouri N., Ghafari R., Zade B. M. H. Cloud computing simulators: A comprehensive review. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2020. Т. 104. P. 102–144. URL: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2020.102144>.
5. Building a cloud on earth: A study of cloud computing data center simulators / M. Abu Sharkh та ін. *Computer Networks*. 2016. Т. 108. С. 78–96. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2016.06.037>.
6. Ahmed A., Sabyasachi A. S. Cloud computing simulators: A detailed survey and future direction. *2014 IEEE International Advance Computing Conference (IACC)*. Gurgaon, India, 21–22 feb. 2014. URL: <https://doi.org/10.1109/iadcc.2014.6779436>.
7. Modeling and simulation of cloud computing: A review / W. Zhao та ін. *2012 IEEE Asia Pacific Cloud Computing Congress (APCloudCC)*. Shenzhen, China, 14–17 nov. 2012. URL: <https://doi.org/10.1109/apcloudcc.2012.6486505>.
8. Ismail A. Energy-driven cloud simulation: existing surveys, simulation supports, impacts and challenges. *Cluster Computing*. 2020. Т. 23/ № 4. P. 3039–3055. URL: <https://doi.org/10.1007/s10586-020-03068-4>.
9. Buyya R., Ranjan R., Calheiros R. N. Modeling and simulation of scalable Cloud computing environments and the CloudSim toolkit: Challenges and opportunities. *Simulation (HPCS)*. Leipzig, Germany, 21–24 june. 2009. URL: <https://doi.org/10.1109/hpcsim.2009.5192685>.
10. CloudSim: A Framework For Modeling And Simulation Of Cloud Computing Infrastructures And Services. URL: <https://github.com/Cloudslab/cloudsim>.

11. Buyya R., Murshed M. GridSim: a toolkit for the modeling and simulation of distributed resource management and scheduling for Grid computing. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*. 2002. Т. 14, № 13–15. P. 1175–1220. URL: <https://doi.org/10.1002/cpe.710>.
12. Сопов О., Жаріков Е. Підхід до консолідації контейнерів у хмарних центрах обробки даних. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2023. Т. 2. № 43. С. 154–163. URL: <https://doi.org/10.20535/1560-8956.43.2023.292267>.
13. S K., Nair M. K. Bin packing algorithms for virtual machine placement in cloud computing: a review. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2019. Т. 9. № 1. С. 512. URL: <https://doi.org/10.11591/ijece.v9i1.pp512-524>.
14. Katal A., Choudhury T., Dahiya S. Energy optimized container placement for cloud data centers: a meta-heuristic approach. *The Journal of Supercomputing*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s11227-023-05462-2>.
15. Telenyk S., Zharikov E., Rolik O. Consolidation of virtual machines using simulated annealing algorithm. *2017 12th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*. Lviv, Ukraine, 5–8 sept. 2017. URL: <https://doi.org/10.1109/stc-csit.2017>.
16. Мова програмування Python. URL: <https://www.python.org/>.

### **Sopov O.O., Zharikov E.V. INSTRUMENTAL TOOLS FOR CONTAINER PLACEMENT SIMULATION IN CLOUD DATA CENTERS**

*The use of container virtualization for deploying applications in the cloud is gaining increasing demand as it allows deployment with fewer redundant resources and faster than the classical virtualization option using virtual machines. Cloud providers face the challenge of efficient resource management, specifically the effective placement of containers on computing nodes. This task requires the development and application of efficient algorithms aimed at reducing the number of simultaneously active physical servers, minimizing SLA violation times, and improving other target metrics of cloud computing. Studying new container placement approaches using a production environment is costly and unstable, as it can interfere with the stable operation of existing cloud services, potentially leading to SLA violations. The article develops a mathematical model for a three-level container load placement problem and tools for simulating container placement in a cloud data center (CDC). The proposed algorithms for the simulator are presented along with activity diagrams, class and component diagrams of the simulation tool, and their detailed descriptions. The proposed tool for simulating container placement in the cloud allows analyzing different strategies for managing a cluster of physical and virtual machines on them, conducting experiments to select optimal strategies, and experimenting without using the existing production environment. The proposed architecture allows for easy addition of new management strategies by inheriting from existing abstractions. A wide range of capabilities for logging experiment results is implemented, enabling the analysis of strategy performance for various optimization criteria. The ability to configure CDC parameters and generate container placement requests according to a given beta distribution is also implemented. A series of experiments confirming the correctness, stability, and idempotence of the developed tool was conducted, and the results of these experiments are presented.*

**Key words:** container virtualization, cloud data center, container placement, optimization, architecture, simulator.

**Чигур І.І.**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

**Чигур Л.Я.**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

## ОГЛЯД МЕТОДІВ І НАПРЯМКІВ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ

У даній статті автори досліджують методи та напрямки розвитку технологій інтелектуальної підтримки прийняття рішень (ІПР) в автоматизованих системах керування. ІПР розглядається як суттєвий компонент таких систем, що дає змогу суттєво підвищити ефективність прийняття управлінських рішень в умовах невизначеності та складності.

Актуальність досліджуваної теми обумовлюється постійним зростанням складності систем керування та необхідністю прийняття оперативних рішень в умовах обмеженої інформації. Використання технологій ІПР дозволяє підвищити об'єктивність та ефективність прийняття таких рішень, що, в свою чергу, сприяє оптимізації роботи систем керування та досягненню кращих результатів.

Практична цінність результатів дослідження полягає в тому, що вони можуть бути використані для розробки нових систем ІПР та вдосконалення існуючих. Крім того, результати дослідження можуть бути корисними для фахівців в галузі автоматизації систем керування при виборі технологій ІПР для конкретних завдань.

В рамках роботи проведено аналіз сучасних методів та інструментів ІПР, до яких належать штучний інтелект, експертні системи, нечітка логіка, штучні нейронні мережі та генетичні алгоритми. Автори роблять акцент на тому, що вибір технології для обробки вихідної інформації, яка використовується особою, що приймає рішення, ґрунтується на специфіці вирішуваних завдань, кількості кількісних та якісних параметрів, що описують проблему, та рівні опрацювання завдання.

З метою пошуку оптимального рішення автори пропонують використовувати генетичні алгоритми на всіх етапах. Це дозволяє здійснити перехід від моделей представлення та використання знань із жорсткими зв'язками до моделей із змінною структурою. Окрім того, автори підкреслюють значний потенціал комбінування технологій штучного інтелекту, наводячи приклад успішного поєднання нечітких систем та нейронних мереж.

Можливі напрямки подальших досліджень включають розробку нових методів та алгоритмів ІПР, дослідження можливостей застосування ІПР в нових областях, а також вдосконалення методів оцінки ефективності систем ІПР.

Ця стаття буде корисною для науковців та фахівців у галузі автоматизації систем керування, а також для осіб, які цікавляться проблемами прийняття рішень в умовах невизначеності.

**Ключові слова:** інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень, штучний інтелект, нечітка логіка, штучні нейронні мережі, генетичні алгоритми, системи керування, бази знань.

**Постановка проблеми.** Питання автоматизації процесів керування з використанням систем підтримки прийняття рішень в останні роки досліджуються досить інтенсивно, вченими отримано досить вагомий результати для широкого класу складних динамічних систем. У той же час залишаються малодосліджені питання інформаційної підтримки прийняття керуючих рішень, що базуються на формалізації накопичених знань і досвіду керування, що зберігаються в базах знань.

Для вирішення задач керування в умовах невизначеності розроблено ряд методів таких як методи ідентифікаційного керування, методи теорії самоналагоджувальних систем, методи адаптивного керування та інші.

Однак реальні процеси функціонування деяких об'єктів, на відміну від моделей, часто відбуваються в умовах не прогнозованих зовнішніх збурень і від внутрішніх змін параметрів самого об'єкта керування. У ряді задач керування залежності між вхідними і вихідними змінними



настільки складні, що не можуть бути описані аналітично, і деякі змінні не можуть бути представлені кількісно. До таких змінних відносяться наприклад лінгвістичні змінні, для роботи з якими застосовуються методи фаззи логіки, чи символічні змінні, значеннями яких є терміни природної мови та інші.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Дослідженням сучасної проблематики, яка стосується інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень займалися значна кількість світових науковців, серед яких Г. Ентоні Джеррі (G. Anthony Gerry), Майкл С. Скотт Мортон (Michael S. Scott Morton), Саймон Герберт Александер (Herbert Alexander Simon), Роберт Н. Ентоні (Robert N. Anthony), Джон Л. Аркетт (John L. Arnott), Ральф Л. Келлі (Ralph L. Keeney), Ерік ван дер Донк (Eric van der Doorn), Євгеній Л. Пономарев (Eugene L. Ponomarev), Катерина В. Олійник (Kateryna V. Oliinyk) та інші.

На основі проведеного аналізу публікацій встановлено, що системи підтримки прийняття рішень (СППР) постійно розвиваються, завдяки появі нових технологій та змінам у потребах користувачів. Ось деякі з ключових напрямків розвитку: використання штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання для покращення аналітичних можливостей СППР, що дозволяє їм обробляти більші обсяги даних, виявляти складні закономірності та робити більш точні прогнози; застосування ШІ для автоматизації завдань, пов'язаних з прийняттям рішень, таких як збирання та аналіз даних, генерування альтернативних рішень та оцінка їх ризиків; розробка СППР на основі ШІ, які можуть адаптуватися до мінливих умов та навчатися на досвіді.

**Постановка завдання.** Метою цієї роботи є огляд і аналіз існуючих методів та технологій СППР для автоматизації процесів керування. Для досягнення цієї мети пропонується провести детальний аналіз кожного з методів СППР, щоб визначити його переваги, недоліки та можливості застосування. Здійснити порівняльний аналіз різних методів СППР, щоб визначити, які з них найкраще підходять для різних типів задач.

**Виклад основного матеріалу.** Оскільки прийняття рішень є складовою частиною процесу керування, розглянемо класичні і сучасні задачі і методи керування складними динамічними системами. Першими в історії керування розглядалися задачі, в яких прийняття рішень по напрацюванню керуючої дії здійснювалося неперервно в кожний момент часу. Ці задачі часто допускають

адекватний опис процесів нелінійними нестационарними диференціальними рівняннями. Постановка і вирішення задач керування спиралась, таким чином, на математичні моделі у формі тих чи інших рівнянь динаміки керованого процесу.

Багато технічних об'єктів керування нафтогазової промисловості ідентифіковані спеціалістами у відповідних предметних областях і описані математичними моделями, які дозволяють дослідження з метою досягнення стабільного, стійкого функціонування об'єктів і вирішення задач оптимального керування [1].

Відомим підходом до вирішення задач керування є ситуаційне керування, що отримало свій розвиток починаючи з 60-х років 20 століття. Принципи ситуаційного керування, сформульовані Д.А. Поспеловим Полягають у наступному. Вводиться визначення поточної ситуації  $Q_j$ , де  $j$  – номер ситуації, як сукупності всіх відомостей про структуру об'єкта керування і його функціонування в даний момент часу, і повної ситуації  $S_i$ , де  $i$  – номер ситуації, як сукупності, що складається з поточної ситуації, знань про стан системи керування в даний момент часу і знань про технологію керування. Нехай у розпорядженні системи керування є  $n$  різних способів впливу на об'єкт керування (однокрокових рішень). Кожне таке рішення позначається як  $U_k$  де  $k$  – номер впливу на об'єкт. Елементарний акт керування можна записати наступним чином:

$$S_i : Q_j \xrightarrow{U_k} Q_l. \quad (1)$$

Суть цього виразу полягає у наступному: якщо на об'єкті керування склалася ситуація  $Q_j$  і стан системи керування, що визначається  $S_i$  допускає застосування впливу  $U_k$ , то цей вплив застосовується і поточна ситуація  $Q_j$  перетворюється у нову ситуацію  $Q_l$ . Очевидно, що через кінцеву кількість різноманітних впливів всю множину можливих ситуацій можна класифікувати на  $n$  класів, кожному з яких відповідає один із можливих впливів на об'єкт керування. Таким чином, метод ситуаційного керування оснований на введенні поняття ситуації, класифікації ситуацій та їх перетворенні.

Основні особливості ситуаційного керування:

1. Ситуаційне керування потребує великих витрат на опис і аналіз предметної області. Ці витрати обумовлені тим, що опис об'єктів, що розглядаються, не може бути формалізований за допомогою відомих аналітичних функціональних залежностей.

2. Опис ситуацій в яких перебуває об'єкт керування повинен бути проведений на тій мові,

в якій би відображалися всі основні параметри і зв'язки, необхідні для класифікацій цього опису і співставленні йому однокрокового керуючого рішення.

3. Опис ситуацій повинен включати як кількісні факти і співвідношення, так і якісні знання, отримані від експертів – спеціалістів відповідної предметної області, у тому числі знання, що виражаються на природній мові.

4. Класифікація ситуацій, об'єднання їх у класи при використанні однокрокових рішень відбувається на суб'єктивній основі, оскільки початкова інформація про відповідність поточної ситуації тому чи іншому рішенню є отриманою на основі експертизи.

5. Системи ситуаційного керування не можуть оптимізувати сам процес керування. Вони орієнтовані лише на таке керування, коли досягнуті результати будуть не гіршими результатів які би могла досягнути людина.

6. Для визначення стратегії керування необхідно розробити процедуру «склеювання» однокрокових рішень.

Вимоги пунктів 3–6 дозволяють зробити висновок, що для ефективної реалізації ситуаційного керування необхідно застосовувати методи і засоби штучного інтелекту. Таким чином метод ситуаційного керування є праобразом методів вирішення задач в системах, що засновані на знаннях.

Розвиток теорії кінцевих автоматів, теорії кібернетики, застосування в контурі керування обчислювальних комплексів стимулювали вирішення задач розпізнавання образів, обробки символічної інформації з використанням логічного виводу, машинного навчання на основі методів штучного інтелекту. При цьому суттєву роль почали відігравати знання експертів у відповідних предметних областях, що стало значним кроком у роботах по штучному інтелекту, який сприяв появі експертних систем, які використовували різні моделі представлення знань.

У теорії керування складними системами виділяється перспективний клас моделей, які базуються на використанні методів штучного інтелекту [2; 3].

Інтелектуальна система керування – це система, що має властивість приймати правильні (ефективні) керуючі рішення в умовах невизначеності функціонування на основі аналізу процесів, що відбуваються з об'єктом керування, поведінки зовнішнього середовища та механізму прийняття (формування) рішень, а також накопи-

чених раніше знань і досвіду (у вигляді прецедентів ситуацій і правил прийняття рішень).

Застосування методів і засобів штучного інтелекту надає нові можливості для вирішення проблемами керування складним об'єктом, оскільки дозволяє інтегрувати абстрактні знання відповідної предметної області, які виражені як у математичній формі, так і у вигляді моделей представлення емпіричних знань експертів.

У загальному випадку в системах штучного інтелекту ці знання використовують для побудови онтології матеріального світу (моделі зовнішнього світу). На базі цих знань і формуються цілеспрямовані впливи на матеріальний світ, які реалізуються наступними способами:

- на основі логіки, наукових досліджень і розрахунків;

- на основі результатів експериментальних досліджень;

- на основі накопичених знань і досвіду (наприклад, у вигляді концептуальних моделей об'єктів і явищ, правил і прецедентів).

Такими ж способами формуються і керуючі рішення в інтелектуальній системі керування складними динамічними об'єктами в умовах невизначеності. При цьому механізм формування рішення може бути побудований на логічному виводі, на нечіткій логіці, на використанні генетичних алгоритмів, на представленні накопичених знань і досвіду у вигляді динамічних моделей, на ймовірнісних і евристичних алгоритмах або на комбінації цих підходів.

При реалізації інтелектуальних функцій неодмінно присутня інформація, яка називається знаннями. Знання, накопичені людьми, можна розділити на формалізовані знання, які допускають аналітичний опис, і не формалізовані знання, представлені зазвичай у символічній формі та у вигляді слабо структурованої проблеми, для опису якої необхідні експертні знання. Для роботи з такими знаннями і необхідні інтелектуальні інформаційні системи.

У рамках логічного погляду на інформацію, відмінність між знаннями і даними може розглядатися у складності та ступені абстрактності їхнього представлення. Дані – це константи  $Q_i$  і факти, тобто елементарні формули (атоми) виду  $P_j(a_{i1}, \dots, a_{im})$ , де  $a_{ij}$  позначає конкретні предмети (числа та ін.),  $P_j$  – предикатні символи, що позначають різні відношення (наприклад, бінарні відношення і т. п.). В рамках логічної моделі знаннями є набір пропозиціональних формул, які є висловами експерта про предметну область.

Дослідники в галузі штучного інтелекту виділяють два основних поняття представлення і обробки знань [4; 5]: символічні системи і пошук. Символічна система – це набір символів, що утворюють символічні структури, і набір процесів, які здатні виробляти, руйнувати і модифікувати символічні структури. Символічна структура позначає деяку суть (об’єкт, процес або іншу символічну структуру), якщо символічна система може здійснювати поведінку, яка визначається даною сутністю або може впливати на цю сутність. Система може інтерпретувати символічну структуру, якщо структура означає деякий процес, і система може виконати цей процес. Символічні системи вирішують задачі за допомогою пошуку, тобто вони генерують потенційні рішення і постійно модифікують їх, доки останні не будуть задовольняти заданим умовам рішення. Приведені гіпотези підтримуються більшістю фахівців по штучному інтелекту і підтверджуються практикою використання існуючих інтелектуальних інформаційних систем.

Основними напрямками штучного інтелекту є:

- експертні системи і системи ґрунтовані на знаннях;
- вивід, ґрунтований на прецедентах;
- штучні нейронні мережі;
- семіотика;
- природно-мовні системи і онтології;

- системи з некласичними логіками і «м’які» обчислення;
- генетичні і еволюційні алгоритми;
- когнітивні карти.

Аналіз деяких напрямків штучного інтелекту для керування складними об’єктами приведено в табл. 1.

У практиці керування складними динамічними об’єктами зазвичай не притримуються границь області допустимих значень контрольованих параметрів з точністю до другого-третього знаку після коми, і багато обмежень найчастіше є «м’якими», тобто такими, що допускають незначні порушення. Границі області критичних режимів також можуть бути нечіткими. Застосування нечітких («м’яких обмежень») значно розширює можливості контролю і керування і робить їх адекватними реальній обстановці в системі. У багатьох задачах контролю і керування складною системою нема необхідності в отриманні оптимального чіткого рішення для кожного моменту часу, оскільки витрати на накопичення інформації та жорстке керування невязок в системі можуть перевищувати отриманий від них ефект.

Реальні задачі містять у собі нечіткі умови і деяку нечіткість мети в зв’язку з тим, що їх постановку здійснює людина. Вплив фактору невизначеності при вирішенні задач багато в чому змінює методи прийняття рішень: змінюється принцип

Таблиця 1

**Аналіз результатів аналізу напрямків штучного інтелекту для керування складними об’єктами**

|                                              | <b>Експертні системи</b>                                                                                                 | <b>Вивід, ґрунтований на прецедентах</b>                                                                                | <b>Штучні нейронні мережі</b>                                                                                                       |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Спосіб отримання знань</i>                | Передача знань від експерта до бази знань експертної системи шляхом діалогу                                              | Накопичення знань в формі прецедентів на основі досвіду                                                                 | Формування навчальної вибірки вхідних образів для ситуації, що розпізнається                                                        |
| <i>Моделі представлення знань</i>            | Продукційні правила, логічні моделі, семантичні мережі, фрейми                                                           | Прецеденти, що містять опис проблеми разом з вказанням рішень, які необхідно прийняти в аналогічній ситуації            | У неявному виді в архітектурі штучної нейронної мережі, параметрах нейронів і зв’язків                                              |
| <i>Методи обробки даних</i>                  | Логічний вивід нових знань над набором пропозиціональних формул                                                          | Вивід рішення відносно даної проблеми або ситуації за результатами пошуку аналогій, які зберігаються в базі прецедентів | Апроксимація функцій вхідних змінних у навченій нейронній мережі                                                                    |
| <i>Можливість використання для керування</i> | Використання для діагностики і оцінки технічного стану об’єкта, формування альтернатив рішень і алгоритмів їх реалізації | Накопичення досвіду керування і його актуалізація шляхом адаптації рішень, що містять прецеденти, до нової ситуації     | Прогноз поведінки об’єкта на даних про його динаміку у минулому, побудова функцій, які розділяють простір станів керованого об’єкта |

представлення початкових даних і параметрів моделі, стають неоднозначними шляхи вирішення задачі і оптимальності рішень. Інтелектуальні системи керування з використанням нечіткої логіки та штучних нейронних мереж реалізовані в [4]. Майже всі прикладні системи, які використовують нечіткі знання – це системи, що базуються на нечітких продукційних правилах, або реляційні системи, що використовують нечіткі відношення.

Практика розробки систем штучного інтелекту показала, що недоліком використання в якості основного джерела знань експертних оцінок є суб'єктивізм судження експерта, тому ним варто користуватися лише у випадку відсутності достовірних апріорних статистичних даних про проблему. У зв'язку з цим перспективним для розробки бази знань інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності є підхід на основі нечітких знань і штучних нейронних мереж.

Методологія підтримки прийняття рішень включає різноманітні технології та методи, які можна частково чи повністю формалізувати. Різні методи мають різні вимоги до вхідних даних і умов роботи, кінцевою метою кожного є допомога особі, яка приймає рішення, у виборі оптимальної альтернативи. З позиції сучасного підходу всі етапи підтримки прийняття рішень потребують застосування спеціальних інформаційних або інтегрованих систем для збору, аналітичної обробки інформації і оцінці альтернатив, в основу яких покладено методи прийняття рішень. Необхідно відзначити, що кожній задачі людської діяльності, яка потребує підтримки прийняття рішень, відповідає метод чи сукупність методів

прийняття рішень. В подальшому будуть розглянуті найбільш відомі і сучасні методи ППР.

Розглянемо процес прийняття рішення в стандарті IDEF0, як одному із основних стандартів при описі процесів і систем. Він включає наступні етапи [3]: аналіз проблеми, формулювання мети і завдань, визначення критеріїв, формування множини альтернатив, аналіз альтернатив, формування керуючих дій. Перелічені етапи утворюють ієрархічну послідовність у якій перехід до наступного кроку неможливий без реалізації попереднього.

Сучасні інформаційні методи і технології потребують застосування формалізованих даних. Тому ефективність методів отримання і підтримки прийняття рішень залежить від ступеня формалізації задачі. Так, для декомпозиції складної задачі до операційного рівня і повної формалізації умов рішення задачі на цьому рівні ефективним є використання методів послідовних операцій. При неможливості декомпозиції і повної формалізації використовують методи статистичної оцінки, теорію нечітких множин, штучні нейронні мережі та інші.

Якщо існує можливість використати дихотомічні змінні для аналізу рішень, застосовують методи формальної логіки.

Якщо існує можливість вибору деяких критеріїв оптимальності, застосовують критеріальний підхід для оптимізації рішень.

На практиці при формулюванні завдань на вербальному рівні опис мети і умов завжди суб'єктивний. Тому виникає задача узагальнення інформації і виключення суб'єктивних факторів при отриманні рішення [5].

Однією з основних проблем оцінки і вибору рішень є представлення експерту отриманих фахівцями-аналітиками рішень в доступному і зрозумілому вигляді. Як правило, особа, яка приймає рішення не володіє фаховими навичками отримання рішень. З цієї причини для формування не одного, а ряду рішень потрібно поряд з рішенням мати певні критерії для його оцінки експертом.

Всі методи підтримки прийняття рішень можна умовно об'єднати у три групи: неформальні (евристичні), колективні і кількісні (рис. 1).

Проведемо порівняльний аналіз інтелектуальних інформаційних технологій, які є ефективними при використовува-



Рис. 1. Класифікація методів підтримки прийняття рішень

тися в СППР при вирішенні важко формалізованих задач, таких як керування процесом буріння: нейронних мереж, нечіткої логіки, генетичних алгоритмів з системами штучного інтелекту на основі класичної логіки. Результати дослідження переваг і недоліків кожної з технологій представлені в табл. 2.

З табл. 2 можна зробити висновок, що методи на основі технологій нейронних мереж, нечіткої логіки і генетичних алгоритмів (ГА) добре вирішують завдання, пов'язані з обробкою неповних, неточних і непереконливих даних. Нейромережі мають здатність узагальнювати розрізнені відомості, які поступають з різних джерел, навчатися і прогнозувати можливе рішення. Генетичні алгоритми у багатьох випадках дозволяють знайти краще рішення з багатьох можливих, мають високі адаптаційні властивості, системи на основі нечіткої логіки дозволяють оперувати нечіткими, недостовірними знаннями.

Класичні методи дослідження операцій і системи штучного інтелекту, побудовані на основі класичної логіки, не володіють такими можливостями. На відміну від класичної логіки, за допомогою методів на основі штучних нейронних мереж, нечіткої логіки і генетичних алгоритмів можливе породження нових знань в умовах дефіциту знань і невизначеності, що дозволяє розширити логічні можливості інтелектуальних систем, що використовують ці технології.

Вибір технології для обробки вихідної інформації, якою оперує особа, що приймає рішення, залежить від особливостей вирішуваних завдань, від кількості кількісних і якісних параметрів, що описують проблему, від рівня опрацьованості завдання. Тому необхідно визначити умови застосовності кожної з розглянутих технологій, а також розробити методи і алгоритми, що дозволяють адаптувати їх до вирішення конкретних завдань проблемної області. У багатьох випадках

Таблиця 2

Результати порівняльного аналізу інтелектуальних технологій створення СППР

| Технологія             | Переваги                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Недоліки                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Штучні нейронні мережі | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Здатність до навчання.</li> <li>2. Стандартні рішення нестандартних задач.</li> <li>3. Можливість прогнозування і швидкого коректування прогнозу при отриманні нових даних.</li> <li>4. Можливість роботи з неточністю, невизначеністю.</li> <li>5. Можливість роботи з нелінійністю.</li> <li>6. Висока ефективність програмного забезпечення.</li> <li>7. Можливість роботи навченої мережі в реальному масштабі часу.</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Відсутність пояснювальної компоненти.</li> <li>2. Великий час навчання.</li> <li>3. Труднощі формування топології нейронної мережі, адекватної поставленому завданню.</li> <li>4. Необхідність формування навчальної вибірки.</li> <li>5. Евристичність параметрів алгоритмів навчання різних типів мереж.</li> </ol>                                                                                           |
| Генетичні алгоритми    | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Швидка збіжність алгоритму при вирішенні задач оптимізації.</li> <li>2. Некритичність до виду параметрів досліджуваних систем: можливість використання експертної, емпіричної, неточною і невизначеною інформації.</li> <li>3. Можливість роботи з нелінійністю.</li> <li>4. Можливість швидкого коректування одержуваних рішень.</li> <li>5. Високі адаптаційні властивості при вирішенні складних проблем.</li> </ol>             | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Можливість отримання неоднозначного результату за рахунок використання механізму випадковості при генерації нових рішень.</li> <li>2. Висока залежність якості прийнятого рішення від способу реалізації генетичних операторів і стратегії пошуку екстремуму.</li> <li>3. Невисока точність одержуваних результатів оптимізації.</li> <li>4. Відсутність можливості роботи в реальному масштабі часу</li> </ol> |
| Нечітка логіка         | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Простота представлення знань. Можливість використання експертних знань.</li> <li>2. Можливість нечіткого задання параметрів досліджуваного об'єкта.</li> <li>3. Можливість пояснення результатів виведення.</li> <li>4. Робота з нелінійністю і невизначеністю.</li> <li>5. Робота в реальному масштабі часу.</li> </ol>                                                                                                            | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Труднощі формування правил і функцій належності експертом.</li> <li>2. Труднощі перевірки на несуперечливість бази знань при отриманні нових знань.</li> <li>3. Відсутність можливості навчання.</li> <li>4. Відсутність можливості оптимізації одержуваних результатів.</li> </ol>                                                                                                                             |
| Класична логіка        | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Простота представлення знань. Можливість використання експертних знань.</li> <li>2. Можливість пояснення результатів виведення.</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Відсутність здатності до навчання.</li> <li>2. Неможливість роботи з неточними даними, невизначеністю, нелінійністю.</li> <li>3. Неможливість отримання оптимальних рішень.</li> <li>4. Відсутність можливості роботи в реальному масштабі часу.</li> </ol>                                                                                                                                                     |

найкраще рішення може бути отримано шляхом використання генетичних алгоритмів на всіх етапах пошуку оптимального рішення, що дозволяє перейти від моделей уявлення і використання знань з жорсткими зв'язками до моделей з змінною структурою.

Значних результатів можна досягти шляхом об'єднання технологій штучного інтелекту. Теоретичною основою об'єднання, наприклад, нечітких систем і нейромережових технологій в єдину систему є результат, який демонструє функціональну еквівалентність між роботою нейронних мереж і висновком в нечітких системах, отриманий в [6].

Основні завдання, які найчастіше мають вирішувати гібридні моделі в СППР, зводяться до наступних: завдання оптимізації, класифікації і розпізнавання, прогнозування, багатокритеріального вибору, логічного виведення і т. д. Для кожної з окремих компонент гібридних моделей, які представлені в табл. 2, необхідно вирішувати ряд внутрішніх проблем, пов'язаних з їхніми недоліками, але спільне їх використання при вирішенні загальної задачі дозволяє компенсувати їх недоліки та посилити переваги, створюючи тим самим синергетичний ефект [7].

При створенні гібридних моделей необхідно враховувати наступні фактори:

- призначення системи;
- методи пошуку і аналізу альтернативних варіантів рішень;
- особливості реалізації.

Основні методи пошуку і аналізу рішень багато в чому визначаються типом заданої початкової інформації, представлені в базах знань, базах даних, базах експертних знань і т. д. Для визначення способів реалізації гібридних моделей виділимо два типи архітектур:

- 1) комплексна архітектура, що складається з декількох взаємодіючих моделей, кожна з яких виконує «свою» функцію;
- 2) архітектура, в якій моделі об'єднуються на рівні методів на окремих стадіях реалізації основних алгоритмів моделей.

Для створення гібридних моделей першого типу необхідно досліджувати недоліки кожної з технологій і визначити шляхи інтеграції для усу-

нення цих недоліків, причому внутрішня структура моделей залишається незмінною.

Створення другого типу моделей вимагає більш глибокого дослідження алгоритмів функціонування кожної з моделей для визначення способу реалізації окремих функцій на основі більш прогресивних технологій.

У даний час більш дослідженим класом є моделі другого типу. Гібридизація нейромережових і нечітких систем розглянута в [6], в яких наведено приклади нейромережових нечітких систем, що реалізують вивід в нечіткій базі знань за допомогою НС – мережі ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), і приклади нечітких нейронних мереж, в яких окремі елементи мережі є нечіткими (наприклад, нейрони). Гібридизація штучних нейронних мереж і генетичних алгоритмів застосовується для вибору оптимальної топології нейронної мережі і для оптимізації навчальної вибірки.

Тому основним підходом для вирішення важко формалізованих завдань, таких як керування процесом буріння, за допомогою СППР пропонується використовувати нейромережовий підхід.

Ефективність його застосування може бути підвищена за рахунок:

- попереднього навчання і налаштування окремих нейронних модулів на вирішуване завдання;
- інтеграція знань про особливості предметної області в структуру ієрархічних (багатошарових) нейронних мереж;
- застосування базових типів гібридних моделей, в яких нейронна мережа зв'язується з іншими інтелектуальними технологіями.

**Висновки.** Аналіз існуючих методів і технологій підтримки прийняття рішень, що всі вони мають свої недоліки і переваги. На основі проведеного аналізу можна зробити висновок про те, що методологічний апарат застосування методів підтримки прийняття рішень можна успішно застосовувати при вирішенні тих чи інших завдань. Однак, якщо завдання є комплексним, то відповідно і вибір методів повинен бути комплексним. Природно, при застосуванні методів для реалізації конкретних прикладних задач необхідна їх агрегація, адаптація та локалізація.

#### Список літератури:

1. Чигур І.І. Інформаційна модель відпрацювання шарошкового долота при бурінні свердловин на нафту і газ. *Методи та прилади контролю якості*. 1999. № 3. С. 34–37.
2. Hopple, G. W. The state of the decision support systems [Text] / G. W. Hopple. Printed in USA, 1988. 246 p.
3. Raymond McLeon Jr., George Schell. Management Information Systems / Raymond McLeon Jr., George Schell. Prentice – Hall, Upper Sadle River, New Jersey 07458, 2001.

4. Chyгур L. Fuzzy monitoring of technical condition of the diamond bits during electric drilling / L. Chyгур, G. Sementsov, I. Chyгур. *Proceedings of 11<sup>th</sup> Zittau Fuzzy Colloquium*. Zittau (Germany), 2004. P. 36–43.
5. Holsapple C.W. *Decision Support Systems (a knowledge based approach)* / C.W. Holsapple, A.B. Whinston. New York : West Publishing Company, 2003. 860 p.
6. Чигур Л.Я. Нейромережева оцінка технічного стану породоруйнівного інструменту / Л.Я. Чигур, Г.Н. Семенов, І.І. Чигур. *Вісник технологічного університету Поділля*. 2004. Ч. 1. Том 1. С. 196–198.
7. Parsaye K. Characterization of data mining technologies and process. *Journal of Data Warehousing*. 1998. № 1.

#### **Chyhur I.I., Chyhur L.Ya. OVERVIEW OF THE METHODS AND DIRECTIONS OF DEVELOPMENT OF INTELLECTUAL SUPPORT OF DECISION-MAKING TECHNOLOGIES IN THE AUTOMATION OF CONTROL PROCESSES**

*In this article, the authors investigate the methods and directions of development of technologies of intelligent decision-making support (IPR) in automated control systems. IPR is considered an essential component of such systems, which makes it possible to significantly increase the effectiveness of management decision-making in conditions of uncertainty and complexity.*

*The relevance of the research topic is determined by the constant growth of the complexity of control systems and the need to make operational decisions in conditions of limited information. The use of IPR technologies makes it possible to increase the objectivity and efficiency of making such decisions, which, in turn, helps to optimize the operation of control systems and achieve better results.*

*The practical value of the research results is that they can be used to develop new IPR systems and improve existing ones. In addition, the results of the study can be useful for specialists in the field of automation of control systems when choosing IPR technologies for specific tasks.*

*As part of the work, an analysis of modern methods and tools of IPR was carried out, which include artificial intelligence, expert systems, fuzzy logic, artificial neural networks and genetic algorithms. The authors emphasize that the choice of technology for processing the source information used by the decision-maker is based on the specifics of the tasks to be solved, the number of quantitative and qualitative parameters describing the problem, and the level of processing the task.*

*In order to find the optimal solution, the authors suggest using genetic algorithms at all stages. This allows for a transition from rigidly coupled models of knowledge representation and use to models with variable structure. In addition, the authors emphasize the significant potential of combining artificial intelligence technologies, giving an example of a successful combination of fuzzy systems and neural networks.*

*Possible areas of further research include the development of new methods and algorithms of IPR, research into the possibilities of using IPR in new areas, as well as improvement of methods for evaluating the effectiveness of IPR systems.*

*This article will be useful for researchers and specialists in the field of automation of control systems, as well as for those interested in decision-making problems under uncertainty.*

**Key words:** *intelligent decision support systems, artificial intelligence, fuzzy logic, artificial neural networks, genetic algorithms, control systems, knowledge bases.*

## ЕНЕРГЕТИКА

УДК 664.723.047

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.1/36>

**Канауз К.О.**

Одеський національний технологічний університет

### ДОСЛІДЖЕННЯ СУШІННЯ НАСІННЕВОГО ЗЕРНА ПШЕНИЦІ В РЕЖИМІ ПУЛЬСУЮЧОГО МІКРОХВИЛЬОВОГО НАГРІВУ

*Наведені результати експериментальних досліджень кінетики сушіння насінневого зерна пшениці в пульсуючому режимі мікрохвильового нагріву. Вивчається вплив тривалості включення магнетрону та пауз на закономірності зміни температур та вологовмісту матеріалу, швидкість сушіння та питомі енерговитрати. У досліджах фіксують потужність магнетрону, початкові та кінцеві маси та температури, тривалість і кількість включень магнетрону і пауз. В експериментах проводилося дослідження сушіння щільного шару зерна пшениці при середній потужності магнетрону  $P = 300 \text{ Вт}$ ,  $P = 180 \text{ Вт}$  та  $P = 100 \text{ Вт}$ . Аналіз кривих кінетики сушіння показує, що на всіх обраних рівнях потужності можна визначити періоди постійної швидкості сушіння. Збільшення тривалості пауз призводить до зниженню темпу нагрівання та дає можливість отримати придатні для насінневого зерна температурні режими. Отримано, що темп нагрівання вищий для пшениці м'якої, ніж для твердої пшениці. Припускається, що частка вільної води вище у м'якій пшениці, що дозволяє дипольним молекулам води інтенсивно переорієнтуватися в мікрохвильовому полі. Як результат, швидкість сушіння вища для м'якої пшениці в порівнянні з твердою. За результатами обробки експериментальних даних отримана залежність швидкості сушіння від середньої потужності мікрохвильового поля та сорту насіння. Представлені енергетичні характеристики ефективності пульсуючого мікрохвильового сушіння в оптимальному режимі. Проведена оцінка насінневих якостей зерна після сушіння із застосуванням мікрохвильової енергії. Зерно після МХ сушіння в різних режимах та контроль (необроблене зерно) зволожувалося та розташовувалося в камері пророщування, через 3 дні та 7 днів визнаена здатність проростання та енергія схожості насіння. Отриманий режим пульсуючого МХ сушіння, за яким отримуються насінневі характеристики зерна.*

**Ключові слова:** вологовміст, температура, кінетика сушіння, експериментальні дослідження, здатність проростання, енергія схожості.

**Постановка проблеми.** В даний час зростає потреба у високопродуктивних сушарках, які дозволяють у стислий термін і з мінімальними втратами оптимізувати передачу зерна з поля на склад. Розвиток технології сушіння зернових матеріалів, заснованої на застосуванні енергії мікрохвильового поля, здатне привести до певних переваг, зокрема отримати високу енергетичну ефективність та більш однорідний розподіл температури та вологовмісту. Особливо слід виділити проблему сушіння насінневого зерна, що пов'язане з необхідністю отримання необхідної схожості. Тому необхідне проведення експериментальних досліджень, необхідних для визначення раціональних за енергетичними показниками умов процесу та отримання якісного насінневого матеріалу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Підвищення схожості насінневого матеріалу зер-

нових та олійних культур в загальнодержавному масштабі дозволить збільшити прибуток від зменшення витрат насінневого матеріалу і суттєвого підвищити врожайність [1]. Проблемі сушіння насінневого матеріалу присвячені праці багатьох дослідників [1–4]. Сушіння повинно знизити вологовміст в насінні до безпечних меж, щоб зберегти його життєздатність під час зберігання, яке в іншому випадку може швидко зіпсуватися через ріст цвілі, нагрівання та активізацію мікробів [3]. Сушіння насіння також дозволяє ранній збір, тривале зберігання насіння, більш ефективне використання землі та робочої сили та отримання високоякісного продукту [4].

Вологість насіння має більший вплив, ніж температура, на довговічність насіння [4]. Загальна залежність полягає в тому, що на кожен відсоток збільшення вологості насіння довговічність



зменшується вдвічі. Це правило стосується насіння з вологістю від 5 до 13 %. При вологовмісті вище 13 %, посилюється процес росту патогенної мікрофлори та спостерігається нагрівання внаслідок дихання, що призводять до швидшого зниження тривалості життя. Коли вологість насіння досягає 18–20 %, посилене дихання і життєдіяльність мікроорганізмів викликають швидке псування насіння. При 30 % вологості більшість насіння проростає. На нижній межі діапазону вологовмісту – від 4 до 5 %, насіння має менший термін служби, ніж насіння, яке зберігається при трохи вищій вологості [6].

Вплив методів сушіння представлено в роботі [6]. Результати показали, що різні методи сушіння мали значний вплив на фізико-хімічні та функціональні властивості ізоляту білка ядра насіння (CPI). Примітно, що порівняно з сублімаційним сушінням (FD) та розпилювальним сушінням (SD), вакуумне сушіння (VD) має більший вплив на колір, гідрофобність поверхні, міжмолекулярні дисульфідні зв'язки, власну флуоресценцію та термічну стабільність (CPI). Мікрохвильовий метод діє набагато швидше, але його потрібно контролювати ретельніше, щоб уникнути перегріву [7]. Експерименти [8] підтверджують можливість інтенсифікації процесу видалення вологи в МХ сушарці насіння пшениці за рахунок створення інтенсивного потоку повітря, нормального до площини шару вологого матеріалу зі швидкостями, характерними для методів фільтраційного сушіння (протягом 3–8 м/с) і параметрами, що відповідають умовам атмосферного тиску. В [9] зразки пшениці з початковим рівнем вологості від 15 до 25 % вологовмісту сушили при щільності потужності МХ поля від 7 до 20 Вт/г протягом 6 хв. Відсоток схожості пшениці зменшувався зі збільшенням щільності МХ потужності при кожній початковій вологості. Прогнозована температура зерна під час сушіння з питомою потужністю 10 Вт/г не перевищувала 65 °С, що вважається безпечним для збереження схожості насіння пшениці. Доведено, що мікрохвильову енергію можна безпечно використовувати для швидшого сушіння насіння пшениці. Стверджується, що комбінація МХ енергії та конвективного сушіння повітрям може усунути недоліки, пов'язані із застосуванням кожного методу окремо [10].

**Постановка завдання.** Метою роботи є отримання даних за кінетику сушіння насіння пшениці при пульсуючому мікрохвильовому підводі енергії та оцінка посівних якостей зерна після сушіння.

## Виклад основного матеріалу Методика проведення експериментів

Схема експериментальної установки та методика обробки експериментальних даних наведені в [11]. При пульсуючому режимі періоди мікрохвильового нагрівання чергуються з паузами. Вивчається вплив тривалості включення магнетрону  $\tau_{MB}$  та пауз  $\tau_n$  на закономірності зміни температур та вологовмісту матеріалу, швидкість сушіння та питомі енерговитрати. У досліджах фіксують потужність магнетрону, початкові та кінцеві маси ( $m_0$ ,  $m_k$ ) та температури ( $t_0$ ,  $t_k$ ), тривалість і кількість включень магнетрону ( $\tau_{MB}$ ,  $n_{MB}$ ) і пауз ( $\tau_n$ ,  $n_n$ ).

Результати експериментальних досліджень кінетики сушіння зерна пшениці при пульсуючому мікрохвильовому підводі енергії

В експериментах проводилося дослідження сушіння пшениці при середній потужності магнетрону  $P = 300$  Вт,  $P = 180$  Вт та  $P = 100$  Вт. Пульсуючий режим полягав у механізмі підведення мікрохвильової енергії: при  $P = 300$  Вт  $\tau_{MB} = 10$  с, пауза  $\tau_n = 25$  с; при  $P = 180$  Вт  $\tau_{MB} = 5$  с, пауза  $\tau_n = 25$  с; при  $P = 100$  Вт тривалість включення магнетрону  $\tau_{MB} = 3$  с, пауза  $\tau_n = 25$  с. Досліджувалась кінетика сушіння пшениці твердих та м'яких сортів. На рис.1 представлені результати дослідження кінетики сушіння твердої пшениці в залежності від часу і потужності магнетрону.

Аналіз графіків показує, що на всіх обраних рівнях потужності можна визначити періоди постійної швидкості сушіння, причому зниження потужності призводить до більш придатних для насінневого зерна температурним режимам. Зміна вологовмісту носить рівномірний характер. Подібні криві отримані також для дослідження кінетики сушіння пшениці м'якої (рис. 2).

Звертає увагу, що темп нагрівання вищий для пшениці м'якої, ніж для твердої пшениці. Це можна пояснити таким. Незважаючи на однаковий початковий вміст вологи, форма зв'язку вологи може бути різною. Можна припустити, що частка вільної вологи вище у м'якої пшениці, що дозволяє дипольним молекулам води інтенсивно переорієнтуватися в мікрохвильовому полі. Внаслідок цього більша частка мікрохвильової енергії перетворюється на теплову. Як результат, швидкість сушіння виходить вищою для м'якої пшениці в порівнянні з твердою. На рис. 3 наведено графіки швидкості сушіння шару пшениці в залежності від потужності, що підводиться, і сорту зерна.

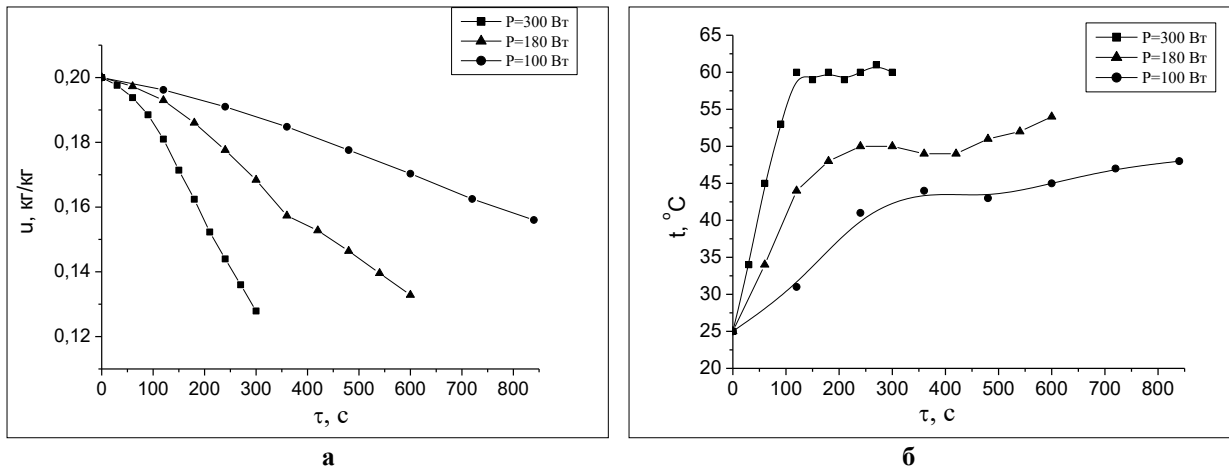


Рис. 1. Кінетика сушіння щільного шару зерна пшениці твердої в пульсуючому режимі МХ сушіння а – зміна вологовмісту в часі, б – зміна температури матеріалу в часі

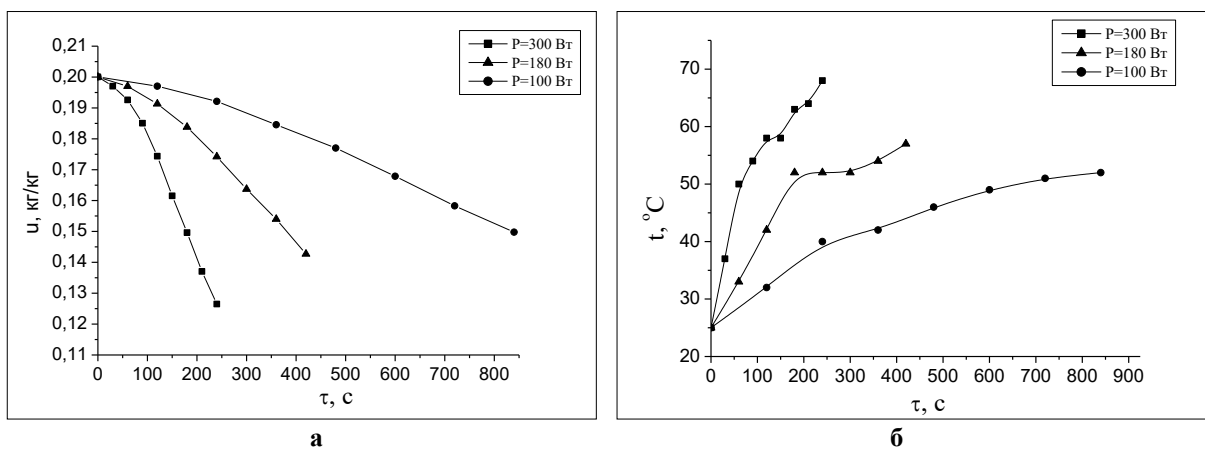


Рис. 2. Кінетика сушіння щільного шару зерна пшениці м'якої в пульсуючому режимі МХ сушіння а – зміна вологовмісту в часі, б – зміна температури матеріалу в часі

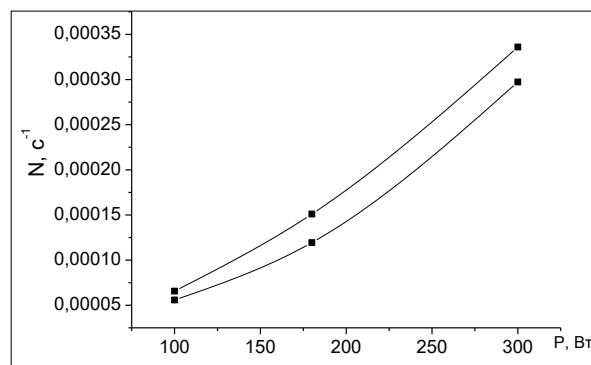


Рис. 3. Залежність швидкості сушіння пшениці м'якої (верхня лінія) та твердої (нижня лінія) від вихідної потужності магнетрону

Видно, що залежність швидкості сушіння від потужності має нелінійний характер. У зазначеному діапазоні параметрів ця залежність може бути представлена у такому вигляді:

$$N = 7 \cdot 10^{-8} \cdot P^{1,486} \cdot \zeta^{-0,356}, \text{ c}^{-1}$$

де  $\zeta$  – характеристика зерна, для м'якої пшениці  $\zeta = 1$ , для пшениці твердої  $\zeta = 2$ .

Похибка емпіричної формули становить 4,2 % у вказаному діапазоні досліджуваних параметрів. Енергетичні характеристики ефективності пульсуючого мікрохвильового сушіння наведені в табл. 1.

Питомі витрати енергії розраховувались на кілограм випарованої вологи.

## Характеристики процесу сушіння при пульсуючій мікрохвильовій сушці зерна пшениці м'якої

| Швидкість сушіння, с <sup>-1</sup> | Кінцева температура, °С | Питомі витрати енергії, МДж/кг | Коефіцієнт використання енергії |
|------------------------------------|-------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| $3,36 \cdot 10^{-4}$               | 69,3                    | 7,85                           | 0,63                            |

## Оцінка посівних якостей зерна після сушіння із застосуванням мікрохвильової енергії

Метою експерименту є оцінка впливу МХ сушіння на насінневі якості насіння, провести наочні спостереження і оцінити вплив мікрохвильового нагрівання при різних режимах.

Методика полягала в наступному:

- після обробки відраховується добірне зерно пшениці, а саме 500 штук для кожного режиму;
- відраховується 500 шт необробленого насіння (контроль);
- зерно розміщується в камері пророщування (рис. 3) відповідно режимам обробки та сорту пшениці.

Через 3 дні та 7 днів визначається здатність проростання та енергія схожості насіння.

За результатами спостережень, сушіння насіння при потужності  $P = 300$  Вт (питома потужність 0,3 Вт/г) призводило до відсутності проростання, сушіння насіння при потужності  $P = 180$  Вт (питома потужність 0,18 Вт/г) пригнічувало проростання. При  $P = 100$  Вт (питома потужність 0,1 Вт/г) насіння проростало також саме як контроль.

На наступному етапі визначалися чисельно енергія проростання (третій день) та енергія схожості (на сьомий день). Розрахунки проводились за формулами:

– енергію проростання зерна кожної аналітичної проби ( $X$ ) у відсотках обчислюють за формулою

$$X = \frac{500 - n}{500} \cdot 100 \%,$$

де  $n$  – кількість зерен, не пророслих за 3 доби, шт.; 500 – кількість зерен в аналітичній пробі, шт.

– енергія схожості зерна кожної аналітичної проби у відсотках обчислюють за формулою

$$E_{cx} = \frac{500 - n_1}{500} \cdot 100 \%,$$

де  $n_1$  – кількість зерен, не пророслих за 7 діб, шт.

Результати розрахунків наведені в табл. 2.

Аналіз таблиці дозволяє стверджувати, що потужність  $P = 300$  Вт неприпустима для сушіння насінневого зерна, тобто питома потужність 0,3 Вт/кг не має бути застосована. Також питома потужність 0,18 Вт/кг призводить до пригнічення проростання насіння. Проте при  $P = 100$  Вт насін-



Рис. 4. Камера для пророщування (вигляд збоку) з підготовленим насінням



а



б

Рис. 5. Зерно в камері для пророщування (а) та насіння (б) на третю добу проростання

Результати розрахунку здатності проростання  $X$  і енергії схожості  $E_{\text{всх}}$  насіння пшениці після МХ сушіння

| Пшениця тверда | 3-й день від початку гідратації    |                        | 7-й день від початку гідратації    |                     |
|----------------|------------------------------------|------------------------|------------------------------------|---------------------|
|                | Кількість непророслого насіння, шт | Енергія проростання, % | Кількість непророслого насіння, шт | Енергія схожості, % |
| P = 300 Вт     | 486                                | 2,8                    | 485                                | 3,0                 |
| P = 180 Вт     | 270                                | 46                     | 265                                | 47                  |
| P = 100 Вт     | 22                                 | 95,6                   | 19                                 | 96,2                |
| Контроль       | 23                                 | 95,4                   | 22                                 | 95,6                |
| Пшениця м'яка  | 3-й день від початку гідратації    |                        | 7-й день від початку гідратації    |                     |
|                | Кількість непророслого насіння, шт | Енергія проростання, % | Кількість непророслого насіння, шт | Енергія схожості, % |
| P = 300 Вт     | 488                                | 2,4                    | 487                                | 2,6                 |
| P = 180 Вт     | 288                                | 42,4                   | 285                                | 43                  |
| P = 100 Вт     | 25                                 | 95                     | 21                                 | 95,8                |
| Контроль       | 27                                 | 94,6                   | 23                                 | 95,4                |

неві якості не погіршувались, навіть спостерігалось незначне підвищення енергії проростання та енергії схожості відносно контролю.

**Висновки.** Збільшення тривалості пауз при пульсуючому мікрохвильовому сушінні призводить до зниженню темпу нагрівання та дає можливість отримати придатні для насінневого зерна температурні режими.

Згідно даним за посівними якостями насіння після сушіння в різних режимах пуль-

суючого мікрохвильового нагріву, МХ потужність  $P = 300$  Вт неприпустима для сушіння насінневого зерна. Також питома потужність  $0,18$  Вт/кг призводить до пригнічення проростання насіння.

МХ потужність  $P = 100$  Вт не призводила до зниження посівних якостей, тому значення питомої потужності  $0,1$  Вт/кг рекомендується до використання в процесах сушіння насінневого зерна.

## Список літератури:

1. Пазюк В. М. Теплотехнічні основи сушіння насінневого зерна – Рукопис : дис. ... доктора технічних наук : 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика (144 – Теплоенергетика) / Інститут технічної теплофізики НАНУ, Київ, 2019. 41 с.
2. Barrozo M. A. S., Mujumdar A., Freire J. T. Air-Drying of Seeds: A Review. *Drying Technology*. 2014. Vol. 32. № 10. P. 1127–1141. URL: <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.915220>, Sanhewe A. J., Ellis R. H. Seed development and maturation in *Phaseolus vulgaris* L. Post-harvest longevity in air-dry storage. *Journal of Experimental Botany*. 1996. Vol. 47. № 7. P. 959–965. URL: <https://doi.org/10.1093/jxb/47.7.959>.
3. Effects of Drying Methods on the Physicochemical and Functional Properties of Cinnamomum camphora Seed Kernel Protein Isolate / M. Ye et al. *Foods*. 2024. Vol. 13. №6. P. 968. URL: <https://doi.org/10.3390/foods13060968>.
4. Characteristic of Corn drying (*Zea Mays* L) using recirculated column dryer / J. N. W. Karyadi et al. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 355. P. 012047. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/355/1/012047>
5. Bewley J. D. Seeds: Physiology of development and germination. New York : Plenum Press, 1985. 367 p.
6. Effects of Drying Methods on the Physicochemical and Functional Properties of Cinnamomum camphora Seed Kernel Protein Isolate / M. Ye et al. *Foods*. 2024. Vol. 13. №6. P. 968. URL: <https://doi.org/10.3390/foods13060968>.
7. Ibragimov M., Eshpulatov N., Matchanov O. Electrical technology of moisture content reduction of industrial-grade cotton seeds. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 883. P. 012135. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/883/1/012135>.
8. Research of wheat drying in a microwave and combined filter-microwave dryer / O. Burdo et al. *EUREKA: Life Sciences*. 2019. Vol. 5. P. 70–78. URL: <https://doi.org/10.21303/2504-5695.2019.001004>.
9. Yıldırım M. The Effect of Drying of Bread Wheat Seeds Following First Water Uptake on Germination Rate. *Turkish Journal of Agriculture – Food Science and Technology*. 2018. Vol. № 6. 1. P. 28. URL: <https://doi.org/10.24925/turjaf.v6i1.28-33.1465>.

10. Microwave Drying Characteristics and Drying Quality Analysis of Corn in China / H. Liu et al. *Processes*. 2021. Vol. 9, no. 9. P. 1511. URL: <https://doi.org/10.3390/pr9091511>.

11. Boshkova I. L., Volgusheva N. V., Kapauz K. O. EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF OAT GRAIN DRYING WITH MICROWAVE-CONVECTIVE HEATING. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. 2024. Vol. 2, no. 1. P. 40–44. URL: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/07>.

### **Kapauz K.O. STUDY OF WHEAT SEED DRYING IN THE PULSE MICROWAVE HEATING MODE**

*The results of experimental studies of the drying kinetics of wheat seed grain in the pulsating mode of microwave heating are given. The influence of the duration of magnetron activation and pauses on the patterns of changes in temperature and moisture content of the material, drying speed and specific energy consumption is studied. In the experiments, the power of the magnetron, the initial and final masses and temperatures, the duration and number of magnetron activations and pauses are recorded. In the experiments, the drying of a dense layer of wheat grain was studied at the average power of the magnetron  $P = 300\text{ W}$ ,  $P = 180\text{ W}$  and  $P = 100\text{ W}$ . Analysis of the drying kinetics curves shows that periods of constant drying speed can be determined at all selected power levels. An increase in the duration of the pauses leads to a decrease in the heating rate and makes it possible to obtain temperature regimes suitable for the seed grain. It was found that the rate of heating is higher for soft wheat than for hard wheat. It is assumed that the share of free moisture is higher in soft wheat, which allows dipole water molecules to intensively reorient in the microwave field. As a result, the drying rate is higher for soft wheat compared to hard wheat. According to the results of experimental data processing, the dependence of the drying speed on the average power of the microwave field and the seed variety was obtained. The energy characteristics of the effectiveness of pulsating microwave drying in the optimal mode are presented. Evaluation of seed qualities of grain after drying using microwave energy was carried out. The grain after MX drying in different modes and the control (untreated grain) was moistened and placed in the germination chamber, after 3 days and 7 days the germination capacity and energy of seed germination were determined. The resulting mode of pulsating MX drying, according to which the seed characteristics of the grain are obtained.*

**Key words:** moisture content, temperature, drying kinetics, experimental studies, germination capacity, germination energy.

**Карпенко Д.С.**

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

**Євтухова Т.О.**

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

**Новосельцев О.В.**

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

**Тесленко О.І.**

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

## **РИНКОВІ ОСОБЛИВОСТІ ВНЕСКУ ВИРОБНИКІВ ТЕПЛОЇ ЕНЕРГІЇ У ВТРАТИ В МЕРЕЖАХ СИСТЕМ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ**

*Дослідження стосується критичних аспектів справедливого розподілу втрат теплової енергії між її виробниками на ринку в системах централізованого теплопостачання. Виконано огляд існуючих підходів до алокації внеску виробників в рівень втрат енергії та визначено їх особливості по відношенню до систем централізованого теплопостачання, що працюють в ринкових умовах. Встановлено підхід до визначення сумарного споживання теплової енергії в системі за рік. Визначено методологічну базу для оцінювання втрат теплової енергії в мережах. Серед критеріїв для визначення внеску кожного виробника в рівень втрат теплової енергії в системі визначено відстань виробника до зваженого центроїда системи об'єктів споживання теплової енергії, обсяг споживання теплової енергії виробленої виробником та нерівномірність шляхів транспортування та постачання теплової енергії по відношенню до відстані до центроїда в системі об'єктів споживання теплової енергії для виробника. Запропоновані критерії можуть бути використані для оцінювання розподілу втрат між виробниками і врахуванню їх вартості в ціні на теплову енергію, яка формується функцією повних витрат виробників. Визначені критерії отримали відповідні вагові коефіцієнти, які підлягають оптимізації в рамках цільової функції з мінімізації середньозваженої ціни на теплову енергію на ринку в системі централізованого теплопостачання. Дослідження проведено із застосуванням багатофакторних оптимізаційних методів. Об'єднання технічних, економічних та нормативних факторів в методах розподілу втрат забезпечить стимулювання інноваційного технологічного оновлення та операційного вдосконалення серед виробників. Наголошено на необхідності справедливого ціноутворення на теплову енергію для споживачів як ефективному засобу підвищення конкурентоспроможності на ринку теплопостачання.*

**Ключові слова:** централізована система теплопостачання, ринок теплової енергії, алокація втрат в теплових мережах.

**Постановка проблеми.** Системи централізованого теплопостачання (СЦТ) є одним з видів міського енергопостачання, що використовують централізоване виробництво та розподіл тепла для обслуговування кількох житлових районів або комплексів. На конкурентному ринку обґрунтований розподіл втрат тепла забезпечує справедливе ціноутворення та стимулює підвищення ефективності системи, де кілька виробників тепла можуть постачати енергію в спільну систему [1]. В умовах монопольного становища в системі, всі втрати та пов'язані витрати на транспортування однозначно

можуть бути визначені та віднесені до основного виробника теплової енергії. Однак, при функціонуванні ринку теплової енергії в СЦТ, постає актуальна задача справедливої алокації внеску кожного виробника теплової енергії в структуру втрат теплової енергії при транспортуванні, оскільки це безпосередньо впливає на визначення рівня ціни на товар при його відпуску в СЦТ. Ефективний і справедливий розподіл втрат тепла в цих мережах між кількома виробниками теплової енергії має вирішальне значення для оптимізації операційної ефективності, економічної ефективності та

конкурентоспроможності. Цей аспект має велике значення на дерегульованих енергетичних ринках, де різні виробники конкурують на основі ефективності та ціноутворення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Підходи до розподілу втрат енергії на ринках набули розвитку, зокрема на ринках електроенергії. Так, ряд дослідників розглядають та пропонують різні методи оцінювання, такі як: пропорційний розподіл [2], граничний розподіл [3], метод Аумана-Шеплі на основі теорії ігор [4] та Z-Bus [5]. Ці методи враховують специфіку транспортування електричної енергії, способи її передачі та характер мереж, але не завжди здатні надавати комплексну оцінку, не враховуючи, наприклад, топологію мереж. При цьому, більшість ідей цих методів можуть бути лише частково застосовані до мереж СЦТ внаслідок різних технічних властивостей таких систем.

Важливо відмітити, що підходи та методи до оцінювання втрат енергії дозволяють моделювати та планувати оптимальні схеми функціонування енергетичних систем, окрім лише тільки оцінювання цього розподілу, з метою підвищення рівня їх ефективності, оскільки транспортні втрати суттєво впливають на загальну ефективність, а мінімізація цих втрат за допомогою оптимального розташування та розміру об'єктів може призвести до значної економії коштів [6]. Однак, існує дефіцит методологій, які оцінюють втрати та їх розподіл саме з перспективи функціонування ринку в системі. В дослідженні [7] пропонується методологія оптимізації розподілу навантаження в СЦТ з кількома джерелами, але без явного вирішення розподілу теплових втрат між різними виробниками в конкурентних умовах.

Існує ряд досліджень, які пропонують інструменти для визначення рівня втрат. Наприклад, дослідження [8] показує, що комп'ютерна бібліотека PyDHN, яка призначена для моделювання теплових мереж показує задовільну узгодженість із даними моніторингу, незважаючи на деякі розбіжності на підстанціях через високу температуру або градієнти масової витрати. Ряд програмних продуктів, таких як Modelica, Apros, IDA-ICE та Simulink, також дозволяють проводити моделювання розподілу та споживання теплової енергії в СЦТ, однак мають певні розбіжності в результатах, тому для підвищення точності оцінювання потребують більш простих моделей [9].

Масштабування СЦТ призводить до підвищення рівня ефективності функціонування сис-

теми [10]. В рамках дослідження [11] отримано оцінку концепції надрегіональних мереж СЦТ, аналогічних мережам передачі електроенергії, призначених для з'єднання багатьох джерел енергії та споживачів на більш широких територіях, потенційно діючи як магістраль сталої енергетичної системи, що безумовно здатне знизити питомі витрати на виробництво енергії через дію ефекту від масштабу, однак питання визначення принципу розподілу втрат енергії стає вкрай важливим в цьому контексті. Також, особливої уваги набувають системи "Power-to-Heat", що дозволяють використовувати енергію відновлювальних джерел енергії для потреб опалення та гарячого водопостачання. Такі системи дозволяють масштабувати СЦТ та робити їх більш гнучкими, що обумовлює синергетичний ефект внаслідок поєднання ринків електричної та теплової енергій. Так, аналіз у дослідженнях [12–14] показує, що інтеграція систем "Power-to-Heat" зменшує залежність від викопного палива взимку та забезпечує більш стабільну роботу як СЦТ, так і систем електропостачання.

Рівень втрат енергії в СЦТ є великим відносно енергетичних систем іншого типу, тому необхідність акцентування на аналізі цієї складової має своє підґрунтя [15–17]. Саме тому, підвищення енергетичної ефективності транспортування теплової енергії в системі відіграє важливу роль при формуванні ринкових умов. Так, ряд досліджень [18–21] пропонують підходи та моделі до визначення схем дизайну теплових мереж, які полягають у визначенні оптимальних характеристик трубопроводів, температури та тиску теплоносія, наполягаючи на тому, що відхилення від оптимального рішення може призводити до нелінійного характеру зниження рівня ефективності транспортування теплової енергії. Варто відзначити, що економічні оцінки таких рішень вказують на вищі початкові інвестиції в трубопровідні мережі, але нижчі експлуатаційні витрати [22–24]. При цьому, важливим є врахування щільності споживання теплової енергії в системі, що може безпосередньо впливати на дисконтовані терміни окупності вкладених інвестицій в переобладнання мереж [25]. Тому, застосування систем енергоменеджменту створює додаткові можливості по контролю та координуванню таких інвестицій з метою забезпечення їх ефективного використання в підсистемі транспортування теплової енергії [26]. Також, одним з методів зниження втрат

теплової енергії, пропонується зниження попиту в існуючих системах через реконструкцію будівель [27], однак, такий підхід потенційно може призводити до дисбалансу в системі, тому такі заходи потребують комплексного врегулювання. Мають місце емпіричні підходи до розрахунку втрат з метою визначення втрат теплової енергії в магістральних трубопроводах. Зокрема, у дослідженні [28] оцінюються можливості термоаерофотозйомки для виявлення дефектів у діючих трубопроводах. Автори виступають за використання БПЛА як практичного рішення для безперервного та детального моніторингу, ефективного для швидкого виявлення розривів трубопроводів або витоків теплоносія.

**Постановка завдання.** Метою роботи є розроблення методологічного підходу до оцінювання внеску кожного виробника теплової енергії у втрати в мережах при функціонуванні СЦТ в ринкових умовах в залежності від його географічного розташування та інфраструктурних особливостей.

Для досягнення даної мети, необхідно виконати наступні задачі:

1. Визначити методологічну базу для оцінювання втрат в СЦТ.
2. Обґрунтувати вибір критеріїв справедливого розподілу втрат теплової енергії між виробниками в ринкових умовах.
3. Запропонувати підходи до включення визначених критеріїв в цільову функцію середньозваженої ціни на теплову енергію.

**Виклад основного матеріалу.** Точне визначення втрат теплової енергії є дуже актуальним питанням в різних аспектах аналізу функціонування систем централізованого тепlopостачання. Ці втрати при транспортуванні в системі можуть бути визначені аналітичним шляхом та шляхом вимірювання, і можуть бути взаємно підтверджуваними в процесі оцінювання втрат. Важливо відмітити, що порядок оцінювання втрат теплової енергії в системі в Україні регулюється відповідними нормативно-правовими документами [29, 30]. Однак, СЦТ має розглядатись у комплексі, враховуючи характеристики як споживачів теплової енергії, так і виробників.

Загалом споживачі теплової енергії характеризуються річним споживанням теплової енергії. Агрегування цього показника по всіх споживачах становить загальний обсяг теплової енергії, спожитої в системі тепlopостачання, і визначається за наступною формулою:

$$Q^{cn} = \sum_{i=1}^n Q_i^{cn}, \quad (1)$$

де  $Q^{cn}$  – обсяг річного споживання теплової енергії усіма споживачами в системі, що аналізується, Гкал;

$Q_i^{cn}$  – обсяг річного споживання теплової енергії  $i$ -тим споживачем, Гкал;

$n$  – кількість споживачів теплової енергії в системі.

Відповідальність за транспортування та постачання теплової енергії в першу чергу лежить на транспортуючій організації в системі. Важливо стежити за станом тепломереж і вчасно проводити ремонтно-профілактичне обслуговування окремих ділянок для збереження ефективності. Для досягнення цього необхідно забезпечити певні стимули для забезпечення того, щоб відсоток втрат у тепломережі залишався в нормативно допустимих межах під час функціонування ринку теплової енергії.

Кожна ділянка теплової мережі, що складається з подавального і зворотного трубопроводу, характеризується такими параметрами, як внутрішній діаметр трубопроводу, спосіб прокладки (надземний, підземний, каналний або безканалний), тип та товщина ізоляції тощо. Ці параметри використовуються для розрахунку теплових і гідравлічних втрат в тепловій мережі, тим самим оцінюючи вплив просторового розташування компонентів СЦТ.

Теплові втрати в теплових мережах визначаються як сума втрат теплової енергії з витоків води з трубопроводів та втрат теплової енергії за рахунок охолодження теплоносія в трубопроводах:

$$Q^{emp} = Q^{sum} + \sum_{j=1}^n q_j^{\circ} \cdot l_j, \quad (2)$$

де  $Q^{sum}$  – кількість втрат теплової енергії з витоків води з трубопроводів, Гкал,

$q_j^{\circ}$  – лінійні втрати теплової енергії за рахунок охолодження теплоносія в  $j$ -тій ділянці трубопроводу, Гкал.

$l_j$  – довжина  $j$ -тої ділянки трубопроводу, м.

Таким чином, сумарна кількість теплової енергії, яка буде вироблена в системі за рік буде являти собою суму теплових втрат в мережі системи тепlopостачання та обсягу річного споживання теплової енергії споживачами:

$$Q_{\Sigma} = Q^{cn} + Q^{emp}. \quad (3)$$

В рамках цільової функції, яка визначається в даному дослідженні, мінімізації підлягає середньозважена ціна за одиницю теплової енергії



в результаті функціонування локального ринку теплової енергії (ЛРТЕ) в системі, а оптимізації підлягають обсяги теплової енергії  $Q_k$  для кожного  $k$ -того виробника:

$$T_{зв.}^M = f(Q_1, \dots, Q_m) \rightarrow \min, \quad (4)$$

де  $T_{зв.}^M$  – середньозважена ціна за одиницю теплової енергії в результаті функціонування ЛРТЕ, грн/Гкал;

$m$  – кількість виробників теплової енергії в системі теплопостачання.

Загальні втрати теплової енергії в системі можна поділити на 2 умовні частини: власні втрати для кожного виробника та втрати в системі віднесені до кожного виробника. Тому, загальні втрати теплової енергії в системі, будуть визначатись за наступною формулою:

$$Q^{emp} = \sum_{k=1}^m Q_k^{emp} = \sum_{k=1}^m (Q_k^{emp.в} + Q_k^{emp.с}), \quad (5)$$

де  $Q_k^{emp}$  – сумарні втрати теплової енергії  $k$ -того виробника за рік, Гкал;

$Q_k^{emp.в}$  – власні втрати теплової енергії  $k$ -того виробника за рік, Гкал;

$Q_k^{emp.с}$  – втрати теплової енергії в системі віднесені до  $k$ -того виробника за рік, Гкал.

Кожний виробник теплової енергії після підключення до теплової мережі буде мати визначений відрізок теплових мереж для відпуску теплової енергії в систему теплопостачання. В процесі передачі теплової енергії, будуть мати місце втрати в цих мережах. Також, внаслідок технологічних особливостей процесу виробництва теплової енергії, об'єкти її виробництва будуть мати втрати теплової енергії на власні потреби. Таким чином, ці втрати, можна закріпити за конкретним об'єктом виробництва теплової енергії, тому, такі втрати можна вважати визначеними. Власні втрати для  $k$ -того виробника теплової енергії будуть визначатись за формулою:

$$Q_k^{emp.в} = Q_k^{эл.п.} + C_k^{emp} \cdot Q_k, \quad (6)$$

де  $Q_k^{эл.п.}$  – втрати теплової енергії на власні потреби об'єкта теплогенерації за рік, Гкал;

$C_k^{emp}$  – коефіцієнт, який характеризує частку втрат теплової енергії від загального обсягу відпущеної теплової енергії власними тепловими мережами.

Інтеграція незалежних виробників в СЦТ на ринкових умовах також створює невизначеність щодо справедливого розподілу втрат теплової енергії. Точне та обґрунтоване віднесення вартості втрат тепла до різних виробників є складним, але важливим для економічної справедливості. Сис-

тема повинна враховувати різні структури витрат на різні джерела енергії та наслідки для ціноутворення та конкурентоспроможності. Якщо система розподілу теплових втрат не враховує належним чином частку кожного окремого виробника, стимули для виробників інвестувати в підвищення ефективності або передові технології можуть бути зменшені, оскільки економічні вигоди від таких інвестицій не отримують належної винагороди. З цим пов'язано ряд технологічних передумов, а саме:

1. Невизначеність походження товару відносно споживача теплової енергії, оскільки в системі функціонує теплопостачальна організація, яка забирає відпущену теплову енергію виробниками і транспортує її трубопроводами, в яких вже неможливо провести диференціацію виробника.

2. Ефективність виробництва теплової енергії може суттєво відрізнятись залежно від різних джерел енергії та технологій, що використовуються незалежними виробниками. Ця мінливість ускладнює оцінку та розподіл втрат тепла, оскільки система повинна враховувати різний внесок у загальний виробничий обсяг (пул).

3. Фізична інфраструктура мереж СЦТ, включаючи довжину та стан розподільних труб, впливає на втрати тепла. Розбіжності в інфраструктурі, пов'язаній з різними виробниками, можуть призвести до труднощів у справедливому розподілі витрат, пов'язаних із цими втратами.

4. Залучення відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), які можуть мати стохастичну та менш передбачувану потужність, додає складності в управлінні та розподілі втрат тепла, особливо з точки зору тимчасової мінливості та потреби в резервних системах.

Частка втрат віднесена до конкретного виробника буде включатись в обсяги виробництва теплової і буде визначати рівень повних витрат на виробництво визначених обсягів на ринку. При цьому, втрати теплової енергії в СЦТ можуть визначатись як розрахунковим шляхом, так і за допомогою лічильників теплової енергії на вводах об'єктів теплогенерації та споживання, визначаючи енергетичний баланс в системі для розподілу втрат теплової енергії між виробниками постфактум.

Для вирішення задачі справедливого розподілу втрат, в рамках дослідження, пропонується визначити ряд критеріїв, за якими буде відбуватись оцінювання обсягів теплової енергії як частка від втрат у теплових мережах  $Q_{emp}$  по відношенню до кожного виробника теплової енергії. Серед критеріїв визначаються наступні:

1. Вага відстані  $k$ -того виробника до зваженого центроїда системи об'єктів споживання теплової енергії. Цей показник характеризує відносне наближення об'єктів виробників теплоенергії до споживачів теплової енергії, враховуючи їх обсяги споживання, окрім їх місцеположення, по відношенню до інших виробників.

Щоб обчислити зважений центроїд такої системи, які мають різні значення споживання теплової енергії, необхідно використати середньозважене значення координат кожного об'єкта, взявши значення їх споживання енергії як вагу.

Формули для зваженого центроїда  $C_x, C_y$  набору точок задаються так:

$$C_x = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i \cdot Q_i^{cn})}{\sum_{i=1}^n Q_i^{cn}}, \quad (7)$$

$$C_y = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i \cdot Q_i^{cn})}{\sum_{i=1}^n Q_i^{cn}}, \quad (8)$$

де  $x_i, y_i$  – координати  $i$ -го об'єкта споживання теплової енергії.

Визначення відстані  $k$ -того виробника до зваженого центроїда відбувається за наступною формулою:

$$l_k = \sqrt{(C_x - x_k)^2 + (C_y - y_k)^2} \quad (9)$$

де  $x_k, y_k$  – координати  $i$ -го об'єкта виробництва теплової енергії.

Визначивши відстань кожного виробника до центроїда, стає можливим визначити вагу відстані  $k$ -того виробника:

$$\varphi_k = \frac{l_k}{\sum_{k=1}^m l_k}, \quad (10)$$

де  $\varphi_k$  – вага відстані  $k$ -того виробника теплової енергії до зваженого центроїда об'єктів споживання теплової енергії в СЦТ, за умови  $\sum_{k=1}^m \varphi_k = 1$ .

На рис. 1 зображений умовний приклад СЦТ з об'єктами виробництва теплової енергії споживання та транспортування, на основі якої, може бути розраховано значення критерію ваги відстані  $k$ -того виробника до зваженого центроїда системи об'єктів споживання теплової енергії.

2. Вага обсягу споживання теплової енергії виробленої  $k$ -тим виробником. Цей показник характеризує кількість виробленої та спожитої теплової енергії від об'єктів виробника теплоенергії в системі по відношенню до інших виробників.

Визначення кількості спожитої теплової енергії від  $k$ -того виробника визначається за формулою:

$$Q_k^{cn} = Q_k - Q_k^{emp}. \quad (11)$$

Вага обсягу споживання теплової енергії виробленої  $k$ -тим виробником визначається за наступною формулою:

$$\alpha_k = \frac{Q_k^{cn}}{\sum_{k=1}^m Q_k^{cn}}, \quad (12)$$

де  $\alpha_k$  – вага обсягу споживання теплової енергії виробленої  $k$ -тим виробником, за умови  $\sum_{k=1}^m \alpha_k = 1$ .

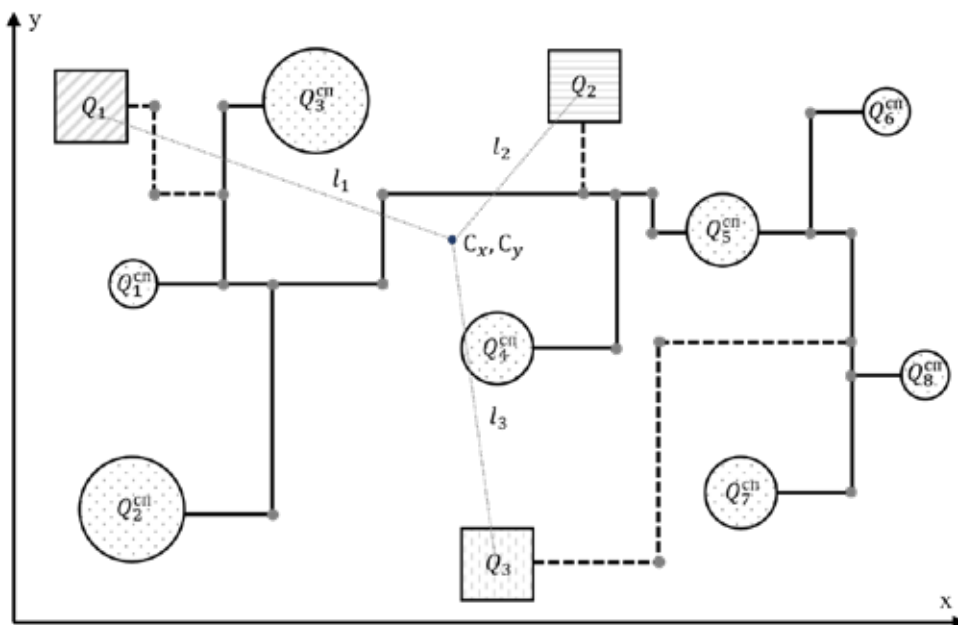


Рис. 1. Умовний приклад системи тепlopостачання для розрахунку значення критерію ваги відстані  $k$ -того виробника до зваженого центроїда системи об'єктів споживання теплової енергії

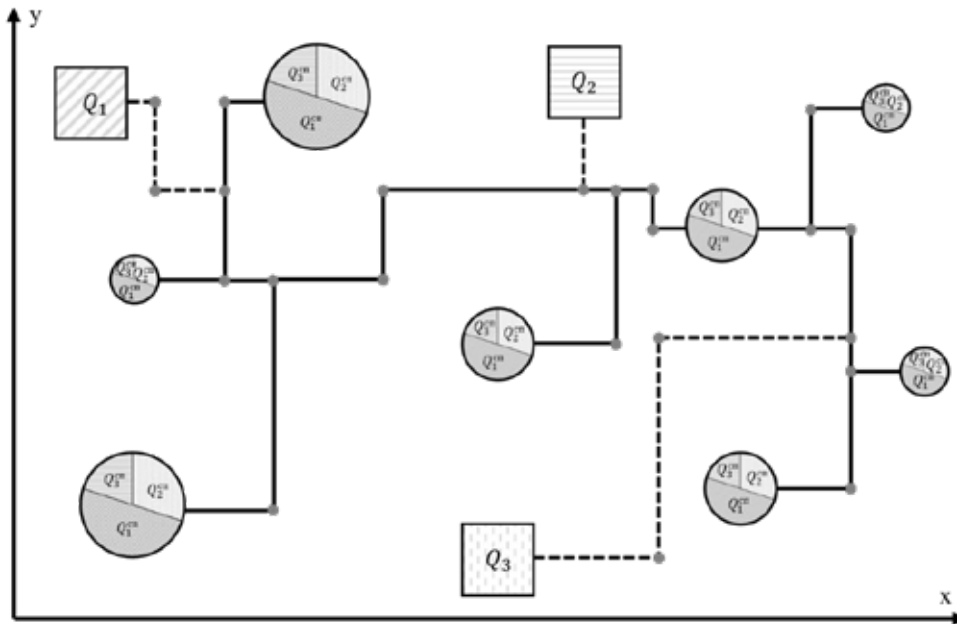


Рис. 2. Умовний приклад системи тепlopостачання для розрахунку значення критерію ваги обсягу споживання теплової енергії виробленої  $k$ -тим виробником

На рис. 2 зображено умовний приклад СЦТ, в якій можуть бути розраховані значення критерію ваги обсягу споживання теплової енергії виробленої  $k$ -тим виробником.

3. Вага нерівномірності шляхів транспортування та постачання теплової енергії по відношенню до відстані до центроїда в системі об'єктів споживання теплової енергії для  $k$ -того виробника теплової енергії.

Для визначення такого критерію, необхідно розрахувати показник для  $i$ -того споживача відносно  $k$ -того виробника, який характеризується співвідношенням суми добутків площі поперечного перерізу та довжини  $j$ -ої ділянки трубопроводу до обсягів споживання теплової енергії  $i$ -тим об'єктом споживання теплової енергії. При чому, кожна оцінювана ділянка теплової мережі для  $i$ -того споживача теплової енергії є складовою частиною в найкоротшому шляху постачання теплової енергії від  $k$ -того виробника теплової енергії. Результат суми всіх споживачів має бути віднесений до відстані до центроїда системи для  $k$ -того виробника теплової енергії. Отже, рівень нерівномірності шляхів транспортування та постачання теплової енергії буде визначатись за наступною формулою:

$$S_k = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^z \left( \frac{\pi \cdot D_j^2}{4} \cdot L_j \right)}{Q_i^{cn}}, \quad (13)$$

де  $D_j$  – діаметр  $j$ -тої ділянки трубопроводу, м<sup>2</sup>;  
 $L_j$  – довжина  $j$ -тої ділянки трубопроводу, м;

$z$  – кількість ділянок трубопроводів у найкоротшому шляху постачання теплової енергії від  $k$ -того виробника теплової енергії до  $i$ -того споживача.

Таким чином, вага нерівномірності шляхів транспортування та постачання теплової енергії для  $k$ -того виробника буде визначатись за формулою:

$$\beta_k = \frac{S_k}{\sum_{k=1}^m S_k}, \quad (14)$$

На рис. 5 зображено умовний приклад СЦТ, в якій можуть бути розраховані значення критерію ваги нерівномірності шляхів транспортування та постачання теплової енергії по відношенню до відстані до центроїда в системі об'єктів споживання теплової енергії для  $k$ -того виробника теплової енергії.

Кожен з визначених критеріїв буде мати свою вагу в цільовій функції і будуть підлягати оптимізації в рамках визначеної системи. Таким чином, загальна форма цільової функції прийме наступний вигляд:

$$T_{зв.}^M = f(Q_1, \dots, Q_m, \omega_\phi, \omega_\alpha, \omega_\beta) \rightarrow \min, \quad (15)$$

де  $\omega_\phi$  – вага критерію  $\phi_k$  – відстані  $k$ -того виробника до зваженого центроїда системи об'єктів споживання теплової енергії;

$\omega_\alpha$  – вага критерію  $\alpha_k$  – обсягу споживання теплової енергії виробленої  $k$ -тим виробником;

$\omega_\beta$  – вага критерію  $\beta_k$  – нерівномірності шляхів транспортування та постачання теплової енергії по відношенню до відстані до центроїда в системі об'єктів споживання теплової енергії для  $k$ -того виробника теплової енергії.

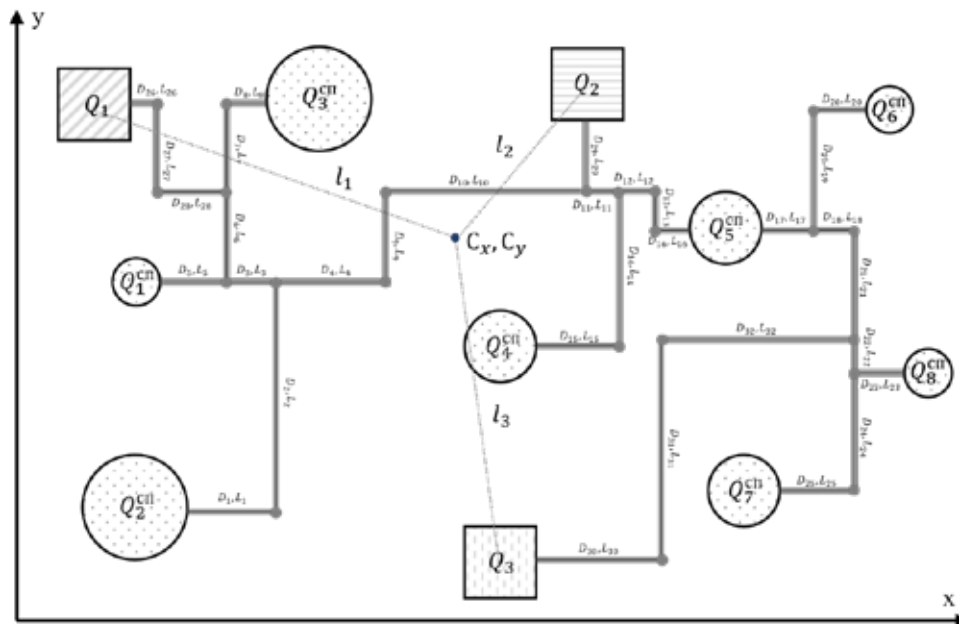


Рис. 3. Умовний приклад системи тепlopостачання для розрахунку значення критерію ваги нерівномірності шляхів транспортування та постачання теплової енергії по відношенню до відстані до центруда в системі об'єктів споживання теплової енергії для  $k$ -того виробника теплової енергії

Таким чином, додатковими обмеженнями для цільової функції будуть наступні вирази:

$$\omega_\phi + \omega_\alpha + \omega_\beta = 1, \quad (16)$$

$$p_\phi^{\min} < \omega_\phi < p_\phi^{\max}, \quad (17)$$

$$p_\alpha^{\min} < \omega_\alpha < p_\alpha^{\max}, \quad (18)$$

$$p_\beta^{\min} < \omega_\beta < p_\beta^{\max}, \quad (19)$$

де  $p_\phi^{\min}$ ,  $p_\alpha^{\min}$ ,  $p_\beta^{\min}$ ,  $p_\phi^{\max}$ ,  $p_\alpha^{\max}$ ,  $p_\beta^{\max}$  – мінімальні та максимальні значення критеріальних вагових коефіцієнтів, які підлягають індивідуальному визначенню в рамках системи тепlopостачання, яка розглядається, з метою справедливого врахування всіх критеріїв.

Отже, враховуючи вищенаведене, втрати теплової енергії в системі віднесені до  $k$ -того виробника будуть визначатись за формулою:

$$Q_k^{\text{emp.c}} = \left( Q^{\text{emp}} - \sum_{k=1}^m Q_k^{\text{emp.s}} \right) \cdot (\omega_\phi \cdot \phi_k + \omega_\alpha \cdot \alpha_k + \omega_\beta \cdot \beta_k) \quad (20)$$

Таким чином, визначені втрати, які розглядаються як внесок  $k$ -того виробника теплової енергії у загальні втрати в системі, дозволяють справедливо оцінювати ціну на теплову енергію цього виробника, яка постачається споживачам.

**Висновки.** В якості методологічної бази для визначення втрат теплової енергії використано аналітичний підхід, який лежить в основі нормативно-правових документів України в частині оцінювання таких втрат. Це дозволяє використовувати затверджені методики і впроваджувати удосконалені методологічні підходи на їх основі.

В результаті виконаного дослідження було вперше запропоновано методологічні принципи оцінювання внеску кожного виробника в рівень втрат теплової енергії в системі, що дозволяє оцінювати кількість енергії яку необхідно додатково виробити, щоб компенсувати втрати в системі. Такий підхід може врегульовувати суперечності у формуванні ціни на теплову енергію виробниками та тарифу для споживачів.

Був запропонований перелік критеріїв, на основі яких може відбуватись визначення внеску кожного виробника в рівень втрат теплової енергії в системі, які в свою чергу мають відповідні вагові коефіцієнти, які підлягають оптимізації при моделюванні ринкових умов в СЦТ.

Ці методологічні підходи можуть бути використані для моделювання СЦТ в ринкових умовах з метою оцінювання та оптимізації конфігурацій суб'єктів системи на етапі впровадження ринку.

## Список літератури:

1. Frölke L., Sousa T., Pinson P. A network-aware market mechanism for decentralized district heating systems. *Applied Energy*. 2022. № 306. P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117956>.
2. Khosravi M., Monsef H., Aliabadi M. H. Approach for allocation of transmission loss based on contribution of generators and loads in injected complex power into network lines. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2017. Vol. 12, № 3. Pp. 713–725. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.0659>.
3. Jesus P., Mario R., Gustavo R. Energy Loss Allocation in Smart Distribution Systems with Electric Vehicle Integration. *Energies*. 2018. Vol. 11. № 1962. Pp. 1–19. <https://doi.org/10.3390/en11081962>.
4. Amaris H., Molina Y. P., Alonso M., Luyo J. E. Loss Allocation in Distribution Networks Based on Aumann–Shapley. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2018. Vol. 6. № 33. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2844740>.
5. Gurung S., Gautam B. K. Review of Various Transmission Loss Allocation Methods: A Case Study of Integrated Nepal Power System using Best Method. *Himalayan Journal of Applied Science and Engineering*. 2022. Vol. 3. № 2. P. 41–54. <https://doi.org/10.3126/hijase.v3i2.52295>.
6. Ok Y., Atak M. Allocation of Distributed Energy Systems at District-Scale over Wide Areas for Sustainable Urban Planning with a MILP Model. *Mathematical Problems in Engineering*. 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/4208415>.
7. Haoran Zhang, Dongnian Yin, Xiaojie Lin, Rong Liu. Load Distribution Optimization of Multi-Source District Heating System Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process. *IEEE Access*. 2020. № 8. P. 209074–209090. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3038381>.
8. Boghetti R., Kämpf J. H. A benchmark for the simulation of meshed district heating networks based on anonymised monitoring data. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023. № 2600. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2600/2/022008>.
9. Arcea I. d. H., Lópeza S. H., Pereza S. L., Rämab M. Models for fast modelling of district heating and cooling networks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. T. 82. № 2. p. 1863–1873. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.109>.
10. Dешко V. I., Zamulko A. I., Karpenko D. S., Mahnitko A., Linkevics O. 2018 Evaluation of the district heating market efficiency as the function of its size and number of competing suppliers. *IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*. 2018. Riga, Latvia. <https://doi.org/10.1109/RTUCON.2018.8659907>.
11. Moser S., Puschnigg S. Supra-Regional District Heating Networks: A Missing Infrastructure for a Sustainable Energy System. *Energies*. 2021. Vol. 3380. № 14. <https://doi.org/10.3390/en14123380>.
12. Schindler M., Gnam L., Puchegger M., Medwenitsch K., Jasek P. Optimization-Based Operation of District Heating Networks: A Case Study for Two Real Sites. *Energies*. 2023. Vol. 16. № 2120. P. 1–15. <https://doi.org/10.3390/en16052120>.
13. Babak V. P., Kulyk M. M. Increasing the efficiency and security of integrated power system operation through heat supply electrification in Ukraine. *Science and Innovation*. 2023. Vol. 19. № 5. P. 100–116. <https://doi.org/10.15407/scine19.05.100>.
14. Derii V., Teslenko O., Lenchevsky E., Denisov V., Maistrenko N. Prospects and Energy-Economic Indicators of Heat Energy Production Through Direct Use of Electricity from Renewable Sources in Modern Heat Generators. In: Zaporozhets, A. (eds) *Systems, Decision and Control in Energy IV. Studies in Systems, Decision and Control*. 2023. Vol. 454. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5_27).
15. Heidariannoghondar M., Ahmadi A. Modeling thermal energy distribution and transmission networks for household consumption through comparative analysis. *Science Progress*. 2023. Vol. 106. № 4. P. 1–37. <https://doi.org/10.1177/00368504231215583>.
16. Bucker D., Jell P., Botsch R. Performance monitoring of rural district heating systems. *16th International Symposium on District Heating and Cooling, DHC2018*. 2018. Hamburg, Germany. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.164>.
17. Каплін М., Білан Т. Агрегована модель енергозабезпечення за структурою даних продуктового енергетичного балансу. *Системні дослідження в енергетиці*. 2023. № 2 (73). P. 48–61. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.02.048>.
18. Wang H., Duanmu L., Li X., Lahdelma R. Optimizing the District Heating Primary Network from the Perspective of Economic-Specific Pressure Loss. *Energies*. 2017. Vol. 10, № 1095, P. 1–12. <https://doi.org/10.3390/en10081095>.
19. Howard D. A., Filonenko K., Busk F. S., Veje C. Methodology for Evaluation of District Heating Network Efficiency. *2020 The 3rd International Conference on Electrical Engineering and Green Energy (CEEGE 2020)*. 2020. E3S Web Conf. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018601006>.
20. Jakubek D., Ocloń P., Nowak-Ocloń M., Sułowicz M., Varbanov P. S., Klemeš J. J. Mathematical modelling and model validation of the heat losses in district heating networks. *Energy*. 2023. № 267. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126460>.

21. Liu Z., Zhang H., Wang Y., Fan X., You S., Jiang Y., Gao X. Optimization of hydraulic distribution using loop adjustment method in meshed district heating system with multiple heat sources. *Energy*. 2023. № 284. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3038381>.
22. Tol H. İ., Svendsen S. The Exergetic, Environmental and Economic Effect of the Hydrostatic Design Static Pressure Level on the Pipe Dimensions of Low-Energy District Heating Networks. *Challenges*. 2013. № 4. P. 1–16. <https://doi.org/10.3390/challe4010001>.
23. Pakare I., Gravelins A., Lauka D., Blumberga D.. Estimating energy efficiency increase in national district heating network. *The 17th International Symposium on District Heating and Cooling, Nottingham Trent University*. 2021. Nottingham, UK. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.088>.
24. Nussbaumer T., Thalmann S. Influence of system design on heat distribution costs in district heating. *Energy*. 2016. № 101. P. 496–505. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.062>.
25. Persson U., Werner S. Heat distribution and the future competitiveness of district heating. *Applied Energy*. 2011. Vol. 3. № 88. P. 568–576. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.09.020>.
26. Ковалко О. М., Ковалко Н. М., Євтухова Т. О., Новосельцев О. В. Комунальна теплоенергетика: енергоефективність, структура управління, енергосервісні послуги. Київ : НАН України, Ін-т заг. Енергетики. 2023. URL: <https://web.nlu.org.ua/object.html?id=2196>.
27. Flores J. F. C., Lacarrière B., Chiu J. N. W., Martin V. Assessing the techno-economic impact of low-temperature subnets in conventional district heating networks. *Energy Procedia*. 2017. № 116. P. 260–272. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.073>.
28. Babak V., Zaporozhets A., Kovtun S., Serhienko R. Methods and Means of Heat Losses Monitoring for Heat Pipelines. *International Journal “NDT Days”*. 2018. Vol. 1. № 2. P. 1–10. <https://www.ndt.net/article/NDTDays2018/papers/JNDTD-v1-n2-a08.pdf>.
29. Про затвердження Порядку формування тарифів на теплову енергію, її виробництво, транспортування та постачання : Постанова НКРЕКП № 1174 від 25.06.2019. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v1174874-19>.
30. Методика визначення витрат та втрат паливно-енергетичних ресурсів для врахування в тарифах на теплову енергію, її виробництво, транспортування та постачання : Постанова НКРЕКП № 1188 від 20.09.2022. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v1188874-22>.

#### **Karpenko D.S., Yevtukhova T.O., Novoseltsev O.V., Teslenko O.I. MARKET FEATURES OF HEAT PRODUCERS CONTRIBUTION TO LOSSES IN DISTRICT HEATING SYSTEM NETWORKS**

*The study addresses critical aspects of the equitable distribution of thermal energy losses among producers in district heating systems. An overview of existing approaches to allocating producers' contributions to energy losses is presented, and their relevance to centralized heat supply systems operating under market conditions is assessed. The study establishes an approach for determining the total annual consumption of thermal energy in the system and defines the methodological basis for assessing thermal energy losses in networks. Key criteria for determining each producer's contribution to thermal energy losses include the producer's distance from the weighted centroid of the system's thermal energy consumption points, the amount of thermal energy produced, and the variability in transportation and supply paths relative to the centroid. These criteria are used to assess the distribution of losses among producers and incorporate their value into the price of thermal energy, which reflects the total costs of production. The identified criteria are assigned appropriate weighting factors, which are optimized within the objective function of minimizing the weighted average price of thermal energy in the centralized heat supply system. The research employs multifactor optimization methods to achieve this. Integrating technical, economic, and regulatory factors in loss allocation methods is expected to stimulate innovative technological upgrades and operational improvements among producers. The study emphasizes the importance of fair pricing of heat energy for consumers as a means of enhancing competitiveness in the heat supply market.*

**Key words:** district heating system, heating market, heat losses allocation in networks.

**Відомості про авторів**

**Антонюк Д.С.** – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

**Батаєв С.В.** – PgDip з цифрового лідерства Університету Уоріка, директор з технологій та архітектури Eleks Holding OÜ, Таллінн, Естонія

**Белоус Р.В.** – асистент кафедри інформаційних систем та технологій факультету інформатики та обчислювальної техніки національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Бернацький А.В.** – кандидат технічних наук, старший дослідник, завідувач відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Бойко С.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій Національного університету «Запорізька політехніка»

**Бондарєва В.І.** – заступник завідувача відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Вакалюк Т.А.** – доктор педагогічних наук, професор, завідувач кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

**Волк М.О.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки

**Волощук В.А.** – доктор технічних наук, професор кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Гайда А.Ю.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних управляючих систем та технологій Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Гвоздік С.Д.** – викладач циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ

**Глуценко А.І.** – магістр кафедри інформаційних технологій Державного університету інфраструктури та технологій

**Головіна Н.В.** – аспірант, викладач-стажист кафедри програмних засобів і технологій Херсонського національного технічного університету

**Гора М.В.** – аспірант кафедри електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки

**Горбань Г.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення Чорноморського національного університету імені Петра Могили

**Данилейко О.О.** – провідний інженер відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України; асистент кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій Навчально-наукового інституту матеріалознавства та зварювання імені Є.О. Патона Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Дерябіна І.О.** – викладач циклової комісії економіки, соціально-гуманітарних та фундаментальних дисциплін Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ

**Дударенко О.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобілів, теплових двигунів та гібридних енергетичних установок Національного університету «Запорізька політехніка»

**Євтухова Т.О.** – кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник відділу прогнозування енергетичної ефективності та перспективних паливно-енергетичних балансів Інституту загальної енергетики Національної академії наук України

**Жаріков Е.В.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформатики та програмної інженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Жученко Л.К.** – доктор філософії, асистент кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Завгородній В.В.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних технологій Державного університету інфраструктури та технологій

**Завгородній В.В.** – асистент кафедри інформаційних технологій Державного університету інфраструктури та технологій

**Завгородня Г.А.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій Державного університету інфраструктури та технологій

**Ісаєв Т.С.** – здобувач (магістр за спеціальністю 123 – Комп’ютерна інженерія) Хмельницького національного університету

**Казимиренко Ю.О.** – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри матеріалознавства і технології металів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Каменський А.О.** – аспірант кафедри інформаційної безпеки та комп’ютерної інженерії Черкаського державного технологічного університету

**Капауз К.О.** – аспірантка четвертого курсу групи А144 кафедри нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики Одеського національного технологічного університету

**Карпенко Д.С.** – кандидат технічних наук, молодший науковий співробітник відділу трансформації структури паливно-енергетичного комплексу Інституту загальної енергетики Національної академії наук України

**Кисіль Т.М.** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри комп’ютерної інженерії та інформаційних систем Хмельницького національного університету

**Ковтун Є.І.** – аспірант кафедри електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки

**Козачок Ю.А.** – магістр за спеціальністю 123 – Комп’ютерна інженерія Чорноморського національного університету імені Петра Могили

**Кондратець В.О.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету

**Котов О.Б.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри транспортних технологій Національного університету «Запорізька політехніка»

**Крилов Є.В.** – кандидат технічних наук, кафедра інформаційних систем та технологій факультету інформатики та обчислювальної техніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Кропивницька В.Б.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп’ютерних систем та мереж Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

**Кропивницький В.Р.** – магістр кафедри комп’ютерних систем та мереж Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

**Кудін О.П.** – аспірант кафедри автомобілів, теплових двигунів та гібридних енергетичних установок Національного університету «Запорізька політехніка»

**Кутковецька Т.О.** – доцент, кандидат економічних наук, доцент кафедри агроінженерії Уманського національного університету садівництва

**Кучеренко О.І.** – аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

**Кучинська К.А.** – магістрантка кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Лабазов В.Г.** – аспірант кафедри електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки

**Лапіна О.С.** – методист навчального відділу Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ

**Левківський В.Л.** – доктор філософії з інженерії програмного забезпечення, доцент кафедри комп’ютерних наук Державного університету «Житомирська політехніка»

**Лукашенко В.А.** – кандидат технічних наук, науковий співробітник відділу «Спеціалізована високочастотна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Любченко Д.В.** – магістр інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»



**Марчук Г.В.** – старший викладач кафедри комп'ютерних наук Державного університету «Житомирська політехніка»

**Матюшин В.О.** – магістр Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Мацуй А.М.** – доктор технічних наук, професор, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету

**Мельник О.С.** – старший інженер комп'ютерних систем Компанії ЕПАМ

**Мойсеєнко О.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем і мереж Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

**Морозов А.В.** – кандидат технічних наук, доцент, проректор з науково-педагогічної роботи Державного університету «Житомирська політехніка»

**Морозова Г.С.** – старший викладач кафедри інформаційних управляючих систем та технологій Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Москалик Д.О.** – аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

**Набок Т.М.** – молодший науковий співробітник відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Новіков П.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Новосельцев О.В.** – доктор технічних наук, член-кореспондент Національної академії наук України, завідувач відділу трансформації структури паливно-енергетичного комплексу Інституту загальної енергетики Національної академії наук України

**Олещенко Л.М.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Павловський О.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Пальоний А.С.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри аеронавігації, метеорології та організації повітряного руху Льотної академії Національного авіаційного університету

**Півторак Д.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського імені Ігоря Сікорського»

**Платов І.М.** – аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Плечистий Д.Д.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук Державного університету «Житомирська політехніка»

**Полозов Д.М.** – магістрант кафедри електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки

**Редько І.В.** – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Реута А.В.** – викладач циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки Кременчуцького льотної коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ

**Ронський С.І.** – аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

**Саранча С.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки

**Світлий І.М.** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем Одеського національного технологічного університету

**Сербул О.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету

**Сердюк О.В.** – аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Сіданченко В.В.** – аспірант кафедри безпеки інформації та телекомунікацій Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

**Сіора О.В.** – науковий співробітник відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Сітайло М.С.** – магістр Державного університету «Житомирська політехніка»

**Соколовський М.В.** – провідний інженер відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Сопов О.О.** – аспірант, асистент кафедри інформатики та програмної інженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Стельмах Н.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Степанець О.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Сущенко В.С.** – аспірант кафедри конструювання електронно-обчислювальної апаратури Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Тесленко О.І.** – кандидат технічних наук, старший дослідник, провідний науковий співробітник відділу трансформації структури паливно-енергетичного комплексу Інституту загальної енергетики Національної академії наук України

**Цибульник С.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Черняк О.І.** – магістрант кафедри автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем Одеського національного технологічного університету

**Чжен Цзінсонг** – студент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Чигур І.І.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації технологічних процесів та моніторингу в екології Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

**Чигур Л.Я.** – кандидат технічних наук, доцентка кафедри автоматизації технологічних процесів та моніторингу в екології Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

**Юрченко Ю.В.** – інженер-технолог I категорії відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Ярмоленко В.В.** – аспірант кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету

## **НОТАТКИ**

Науковий журнал

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

**Серія: Технічні науки**

**Том 35 (74) № 3 2024**

**Частина 1**

Коректура • *Н. Славогородська*

Комп'ютерна верстка • *Ю. Семенченко*

Адреса редакції:

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

м. Київ, вул. Джона Маккейна, 33

Електронна пошта: [editor@tech.vernadskyjournals.in.ua](mailto:editor@tech.vernadskyjournals.in.ua)

Сторінка журналу: [www.tech.vernadskyjournals.in.ua](http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua)

Формат 60×84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 23,26. Ум. друк. арк. 33,02. Зам. № 0724/514.

Підписано до друку 28.06.2024. 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](mailto:mailbox@helvetica.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 7623 від 22.06.2022 р.